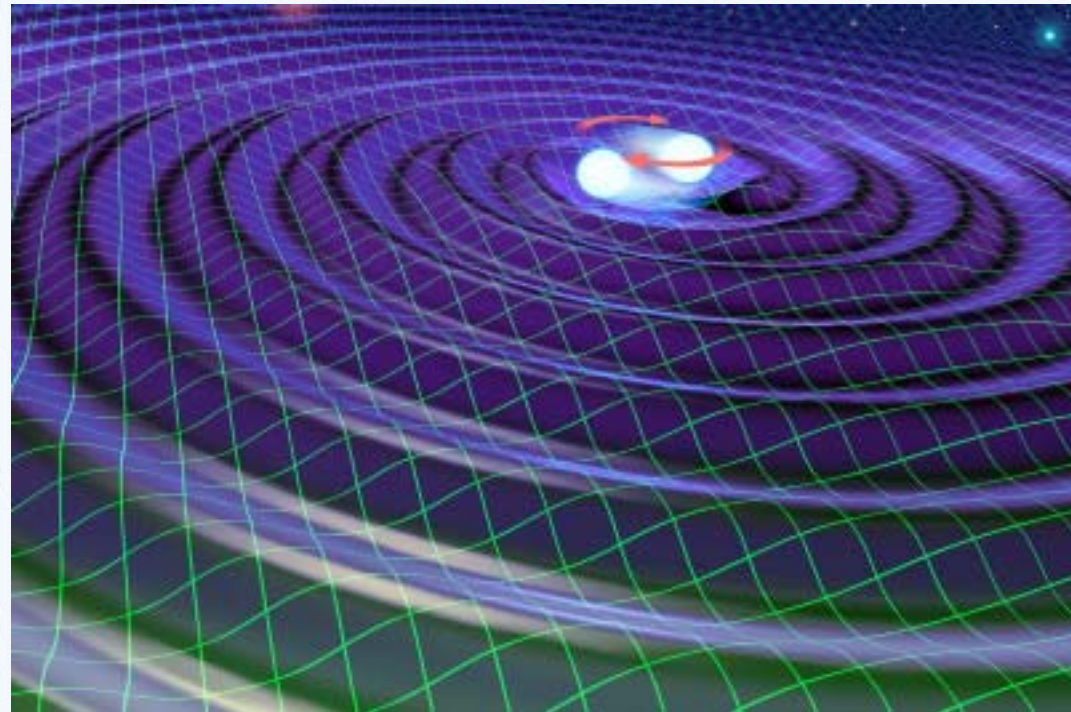


重力波をとらえる



イラスト/KAGAYA

安東 正樹 (東京大学 理学系研究科, TAMA collaboration)

ICEPP-Symposium 10 (2004年2月15日-18日 岳美山荘, 白馬, 長野)



第II部 将来計画

目次



1. はじめに

検出器の高感度化と多波長化

2. LCGT

概要

各種雑音の低減技術

低温干渉計

3. LISA

概要, デザイン

4. DECIGO

概要, デザイン

5. まとめ

目次



1. はじめに

検出器の高感度化と多波長化

はじめに (1)

- 感度限界と改良 -



- 重力波天文学をめざして

干渉計型重力波検出器は稼動を始めている

銀河系内イベントを捕らえるのに十分な感度と安定度

 しかし ...

本格的な天文学には、さらなる努力が必要

低いイベントレートしか期待できない

中性子星連星合体 : 10^{-4} events/yr/galaxy

超新星爆発 : 10^{-2} events/yr/galaxy

観測周波数帯が限られている

100Hz-1kHz付近のみ



将来計画が必要

はじめに (2)

- 感度限界と改良 -



● 将来計画

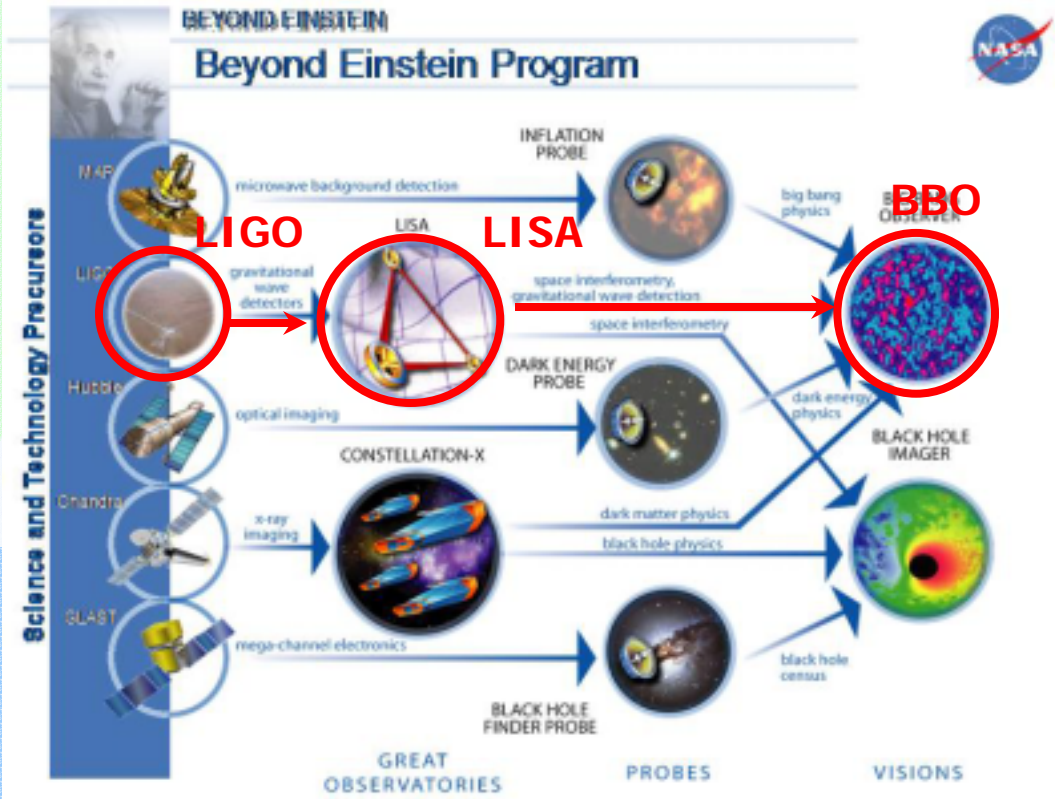
高感度化

遠方まで観測
イベント数の増加
感度が10倍 (観測レンジ10倍)
観測可能な銀河数 10^3 倍

広い観測周波数

多様な重力波イベントの観測
重力波の周波数：
系のスケールに依存

地上での高感度検出器
LCGT (JPN), EURO (Europe),
Advanced LIGO (USA)
宇宙レーザー干渉計
LISA (NASA/ESA)
DECIGO (JPN), BBO (NASA/ESA)



はじめに (3)

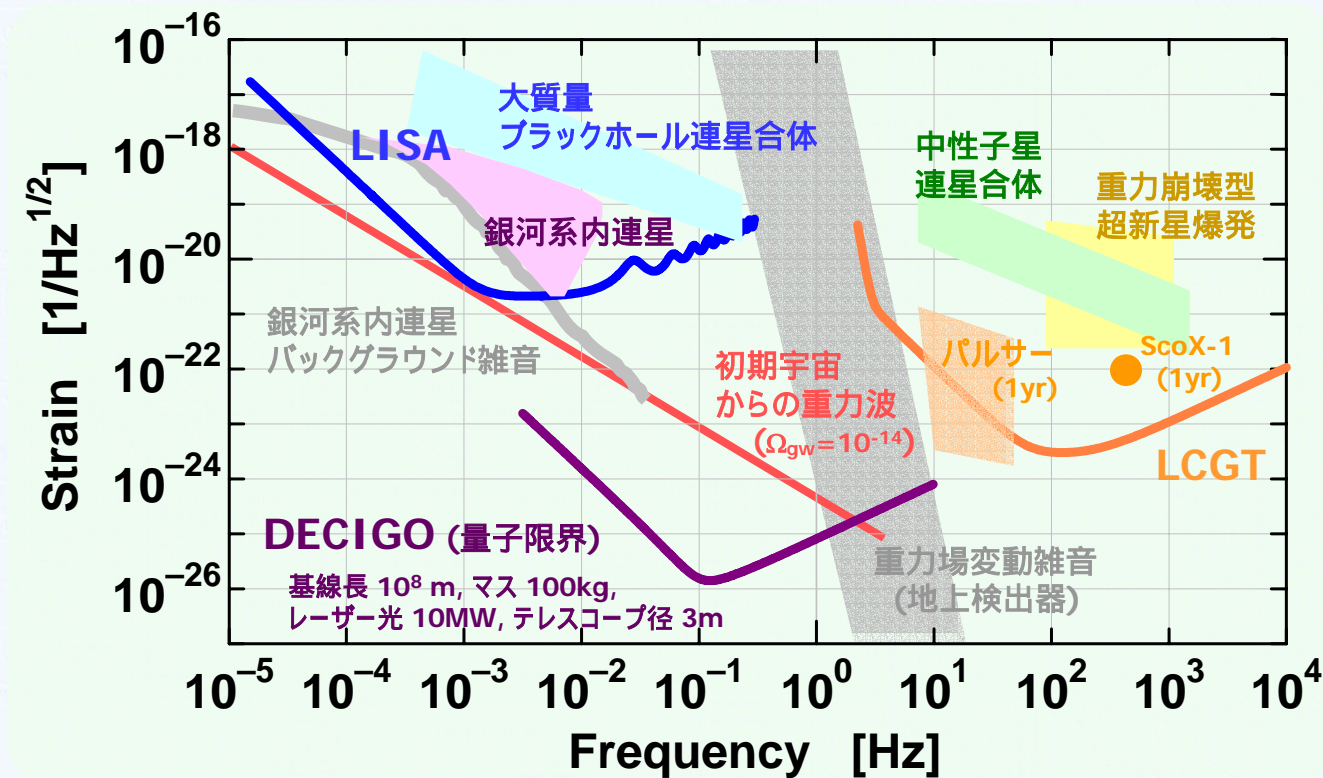
- 感度限界と改良 -



- 多様な重力波源

重力波の周波数, 検出器の周波数:

系のスケール, 基線長に依存 (長い 低周波数)



目次



2. LCGT

概要

雑音低減の技術

低温干渉計

LCGTの概要(1)

- LCGTの概要 -



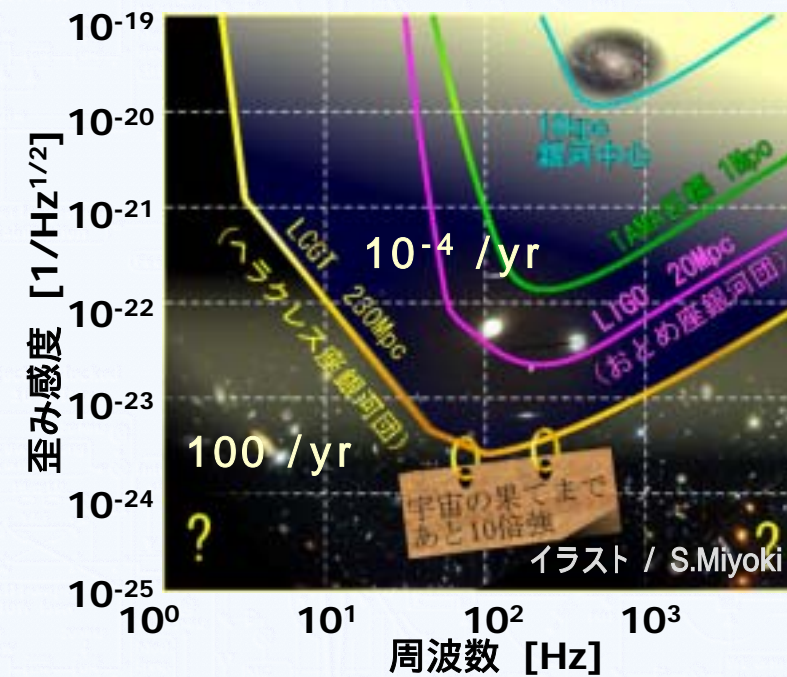
● LCGT計画

日本の将来計画

基線長 3km の地下低温干渉計, 同一サイトに2台の干渉計

全ての周波数帯で感度を向上

⇒ 240Mpc 遠方の連星中性子星合体をSN比10で観測



LCGTの概要(2)

- はじめに -



- 干渉計型重力波検出器

- 地面振動

- 地面の振動が鏡を揺らす影響

- ➡ 防振装置、長基線長、静かなサイト

- 熱雑音 (鏡の熱雑音・振り子の熱雑音)

- 鏡やその支持系の熱振動

- ➡ 高いQ値、鏡などの冷却、長基線長

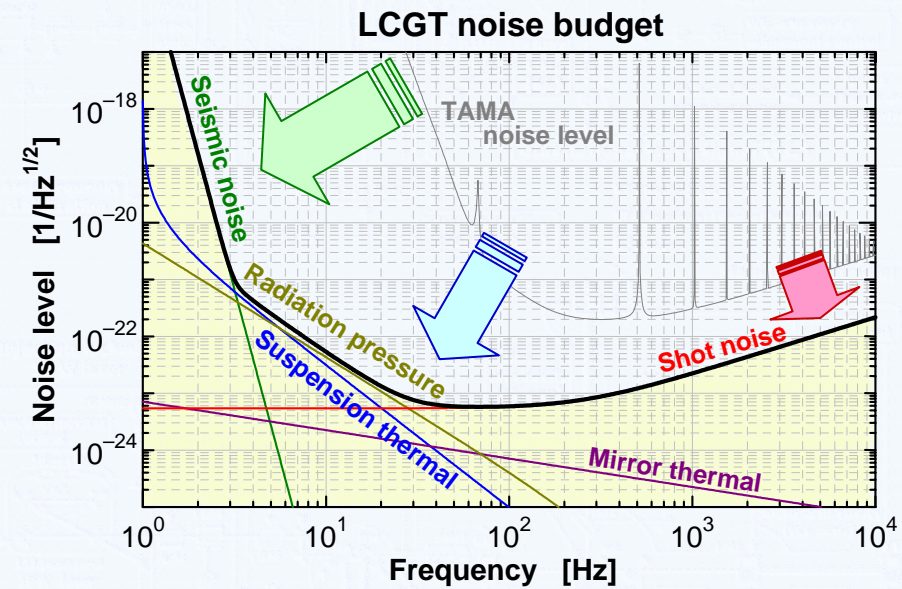
- 量子雑音 (散射雑音・輻射圧雑音)

- レーザー光が光子の集合であることに起因する雑音

- ➡ 高出力レーザー、干渉計方式

- その他の雑音

- 残留ガス揺らぎ、レーザー光源、制御雑音、...

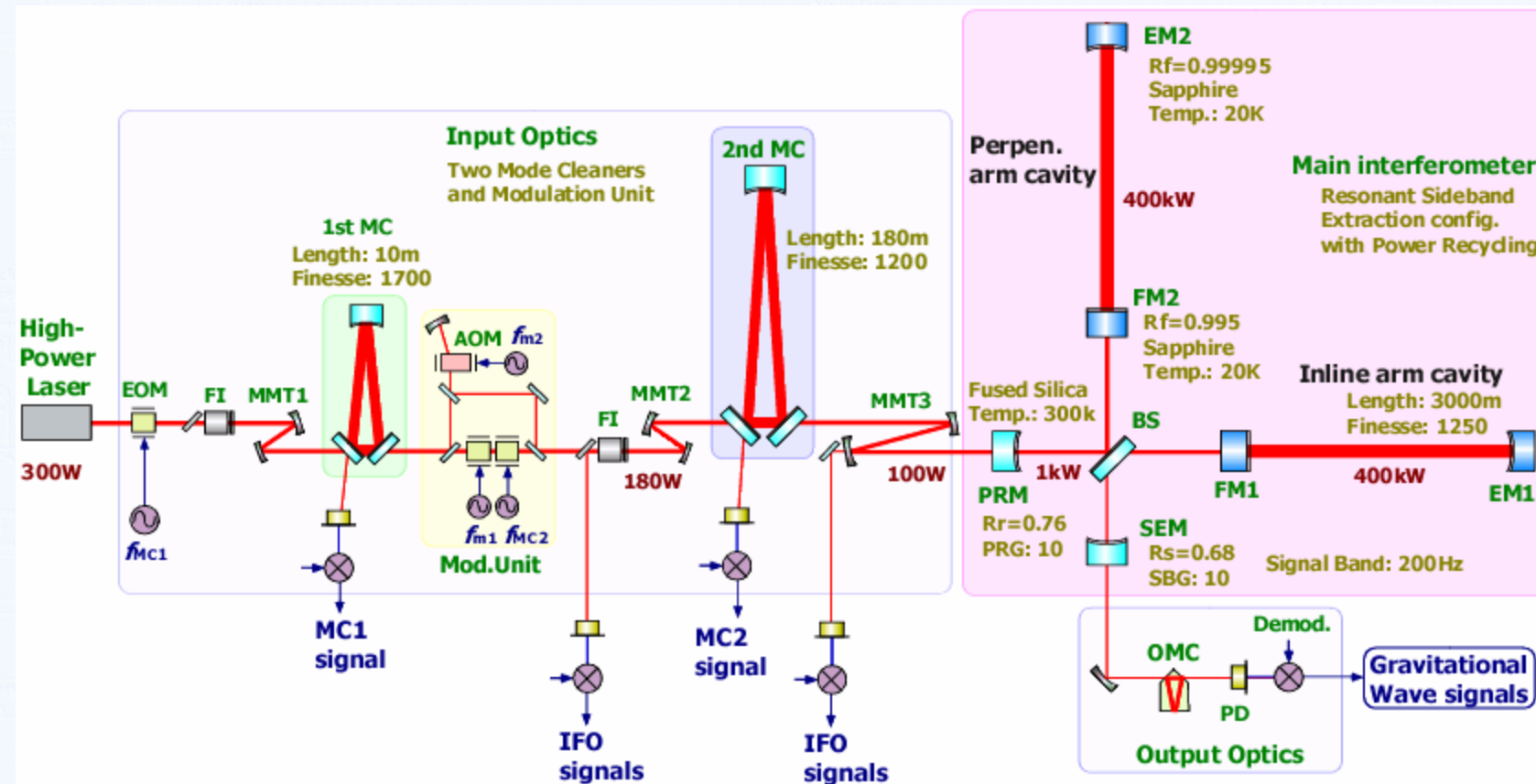


LCGTの概要(3)

- LCGT -



● LCGT光学系



LCGTの技術 (1)

- 量子雑音の低減 -



- 量子雑音の低減

LCGTの感度：

ほぼ量子雑音で決まる

(散射雑音, 輻射圧雑音)

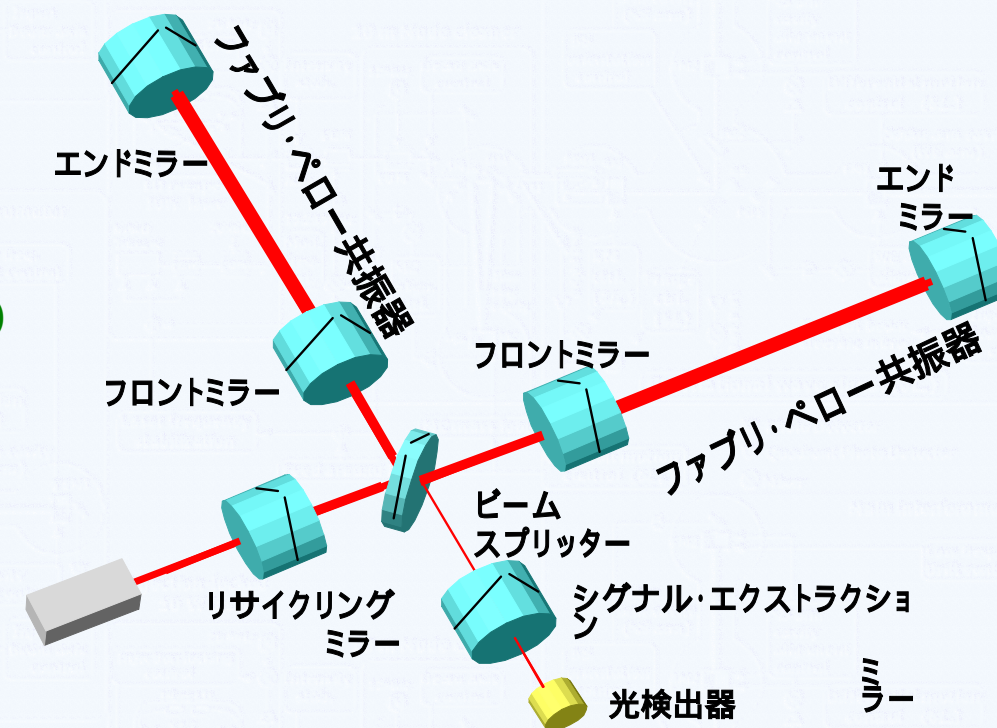


ハイパワーレーザー光源 (300W)

干渉計方式の工夫 (RSE方式)

→ 実効パワーの増加,

量子雑音の最適化



LCGTの技術 (2)

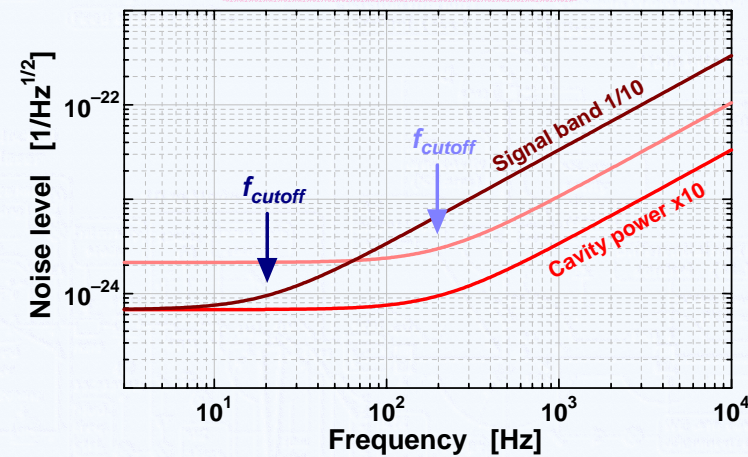
- 干渉計パラメータの調節 -



● 干渉計のパラメータへの依存性

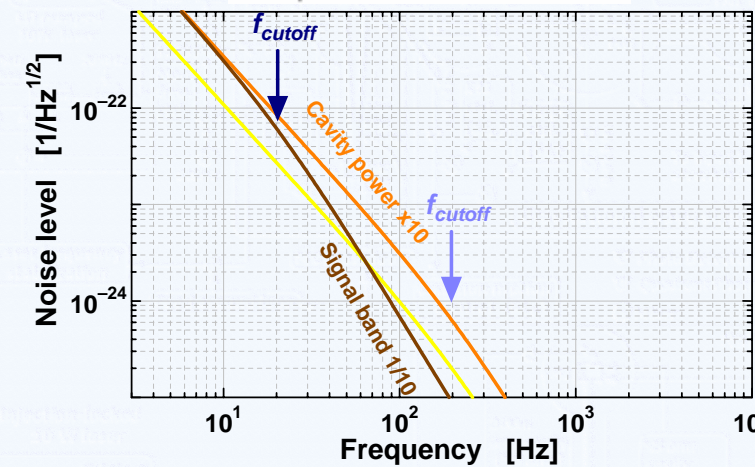
散射雑音 (shot noise)

$$\sqrt{\frac{f_c}{P_c} \cdot 1 + (f/f_c)^2}$$



輻射圧雑音 (radiation pressure noise)

$$\frac{1}{f^2} \sqrt{\frac{P_c}{f_c} \cdot \frac{1}{1 + (f/f_c)^2}}$$



量子雑音 (散射雑音・輻射圧雑音) は、光パワーと信号帯域のみで決まる
(干渉計方式には依存しない)

同様に信号サイドバンドが生成され、積算されるため

LCGTの技術 (3)

- 干渉計方式の比較 -



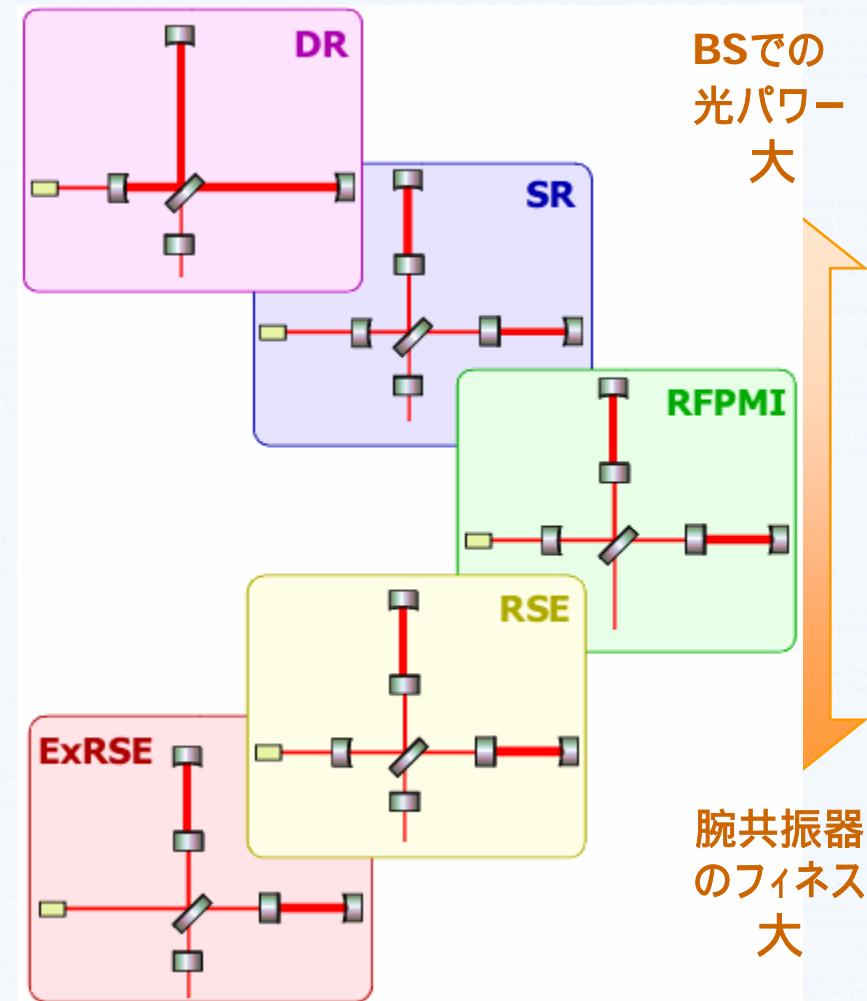
• 干渉計方式と量子雑音

原理的には、どの方式でも
同じ光パワーと信号帯域
を実現する事ができる
光パワー : 腕共振器とPRM
信号帯域 : 腕共振器とSRM

実際上の問題を考慮して選択される
光のロス (鏡のロス、有限のコントラスト)
制御の容易さ (制御すべき自由度)

計画中の将来の干渉計 (LCGT, Ad. LIGO)
RSE方式が採用される予定

大光量を実現しやすい
基材のロス(発熱)が問題になりにくい
狭帯域化が可能



LCGTの技術 (4)

- 干渉計パラメータの最適化 -



● 干渉計パラメータの最適化

ターゲットに応じて、
干渉計パラメータ (腕フィネス、PRG, SBG)
を最適化

(例) LCGTの設計

感度：ほぼ量子雑音で制限される
条件：1.4 M_{\odot} 連星合体観測に最適化

⇒ 観測レンジの等高線マップ



ロス等を考慮して実現可能な値を選択

腕共振器フィネス：1250

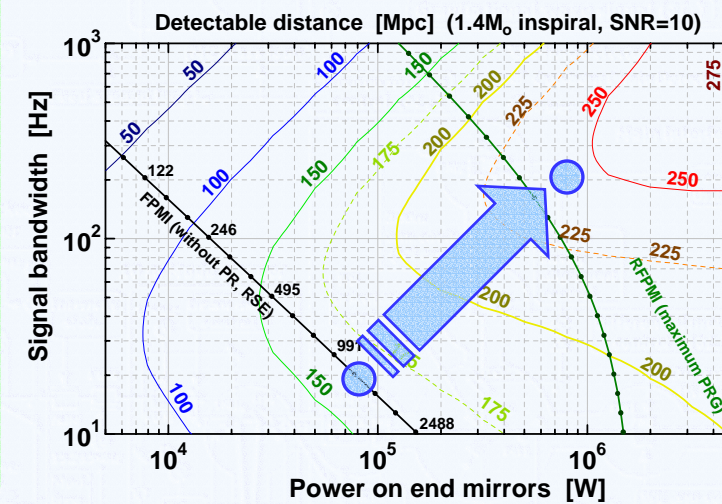
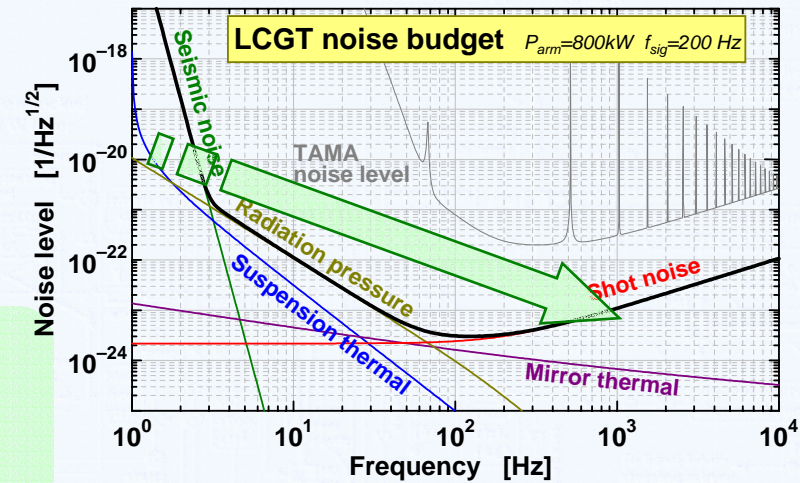
PRG：10

SBG：10

(基線長 3km, 入射レーザー光 100W)

⇒ 240Mpcの観測レンジ

(SNR 10, 最適方向入射)



LCGTの技術 (5)

- LCGTのデザイン -



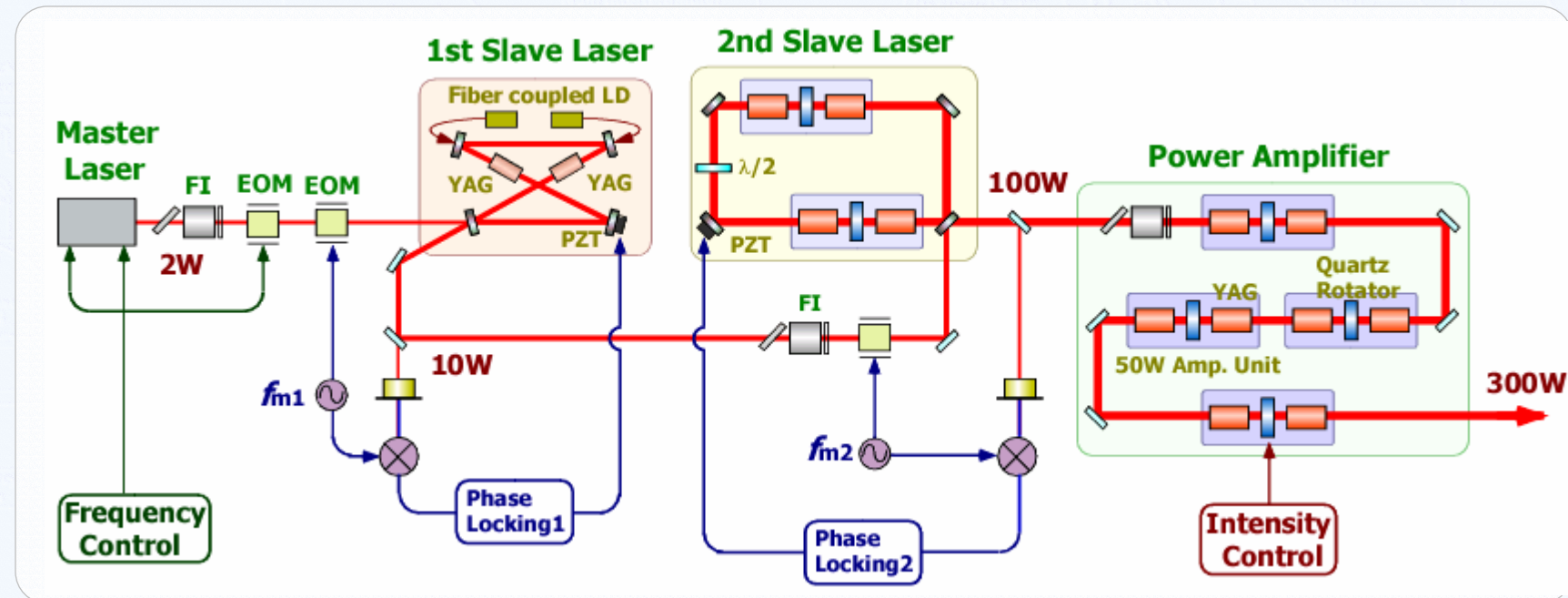
● LCGTのデザイン

300Wレーザー光源

2段の注入同期と 4段x50Wの光アンプ の組み合わせ

50W光アンプ : 拡散反射を用いた均一励起, 偏光子 熱の影響を低減

周波数・強度安定化 : TAMAの方式を踏襲



LCGTの技術 (6)

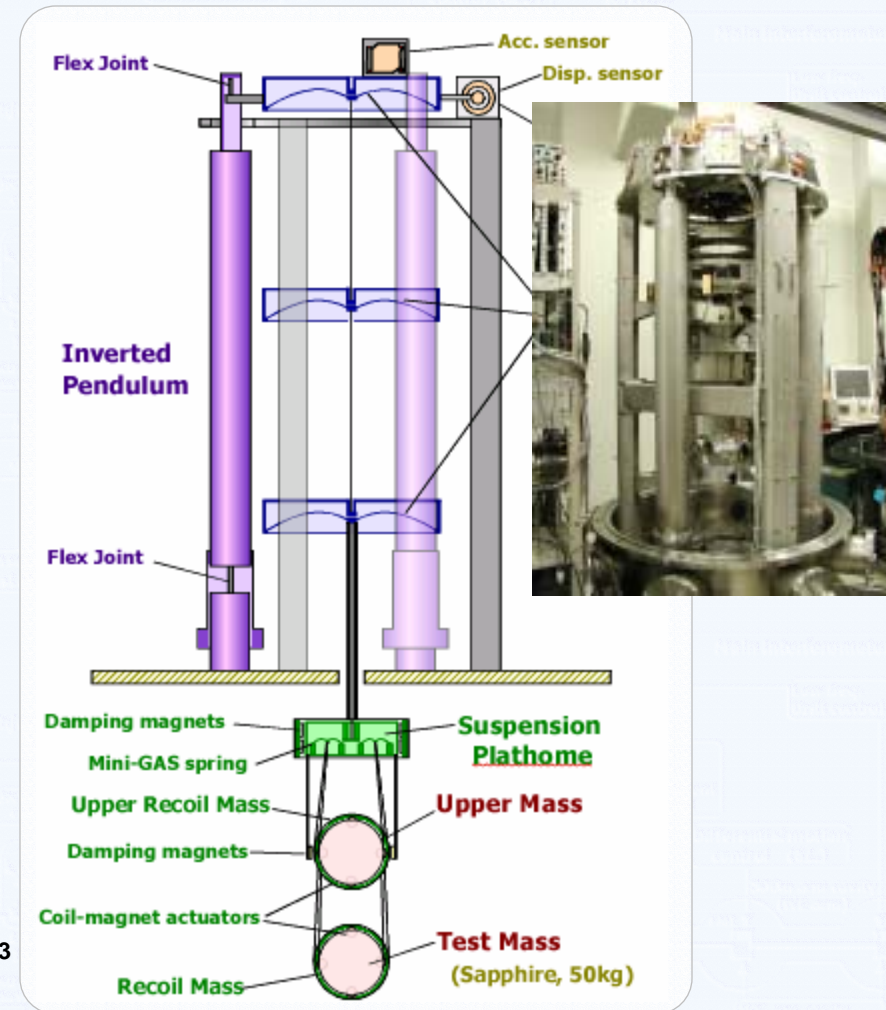
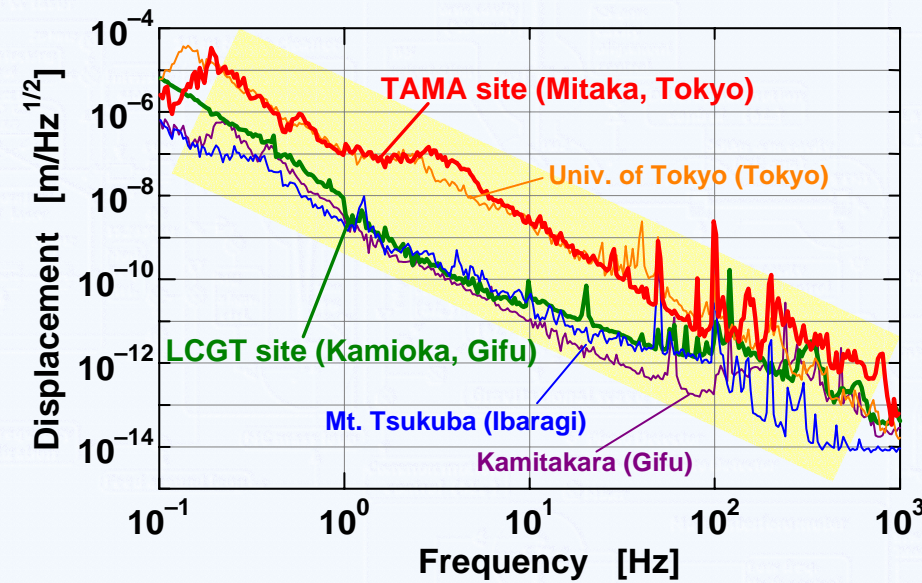
- 地面振動の低減 -



● 地面振動の低減

基線長の増加 3km
 神岡鉱山の静寂な環境
 (2桁振動が小さい)

よりよい防振装置
 (低周波多段防振, 能動防振)



LCGTの技術 (7)

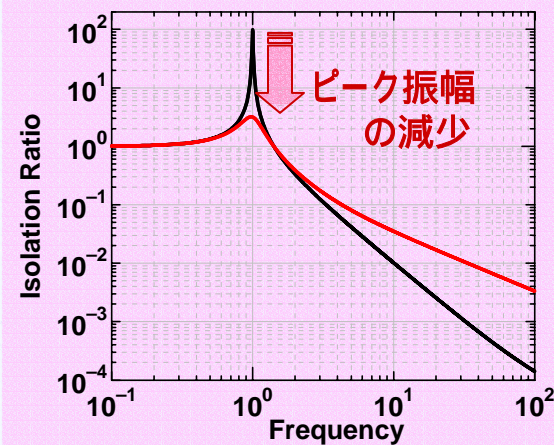
- 受動防振装置の高性能化 -



- より良い防振装置の実現
防振比の向上、安定動作

ダンピング

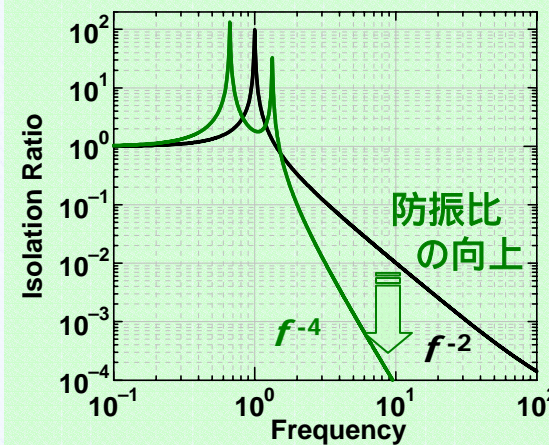
共振周波数のQ値を下げる
安定度の向上



防振性能は低下する

多段化

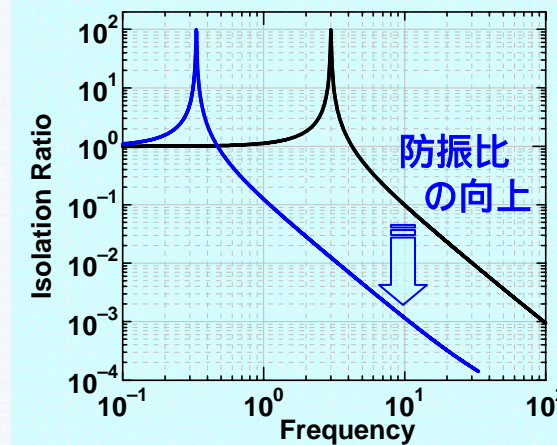
より急峻な防振比特性
防振比の向上



共振のピークが増える

低共振周波数化

共振周波数を下げる
防振比の向上



温度などのドリフトに弱くなる

これらの要素をいかに組み合わせるかが大事

LCGTの技術 (8)

- 多段化 -



● 防振装置の多段化

理想的な n 段振り子の防振比

$$\frac{x}{x_0} \sim \left(\frac{f_0}{f}\right)^{2n}$$

段数が多いほど急峻な防振特性
段数分の共振のピーク

実際には、多くの共振が
カップルした複雑な応答

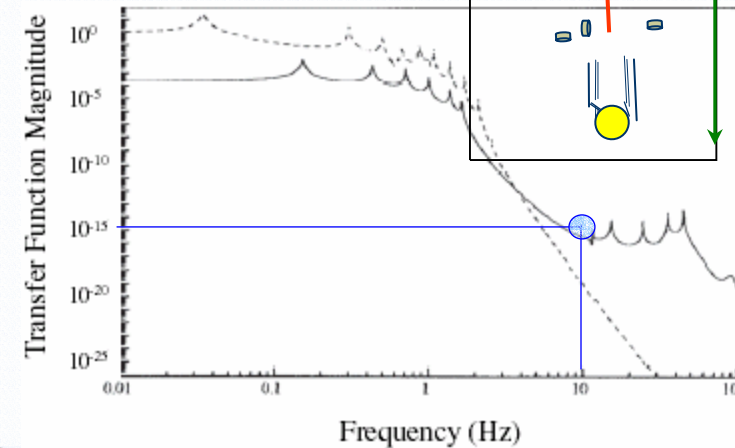
安定動作のためには、
ダンピングが不可欠
(防振比を損なわない設計が必要)
応答が複雑になる
制御系の設計に注意が必要

VIRGO (Super Attenuator)

高さ 8m
水平方向 9段
鉛直方向 6段

最上部でダンピング
鏡と鏡上部で位置制御

10Hzで15桁程度の防振



LCGTの技術 (9)

- 共振周波数の低減 -



● 共振周波数の低減

振り子等の共振周波数の低下

防振比の向上

共振周波数：防振系の大きさに制限される

⇒ 工夫が必要：反バネの利用

(変動を増加させる向きの力)

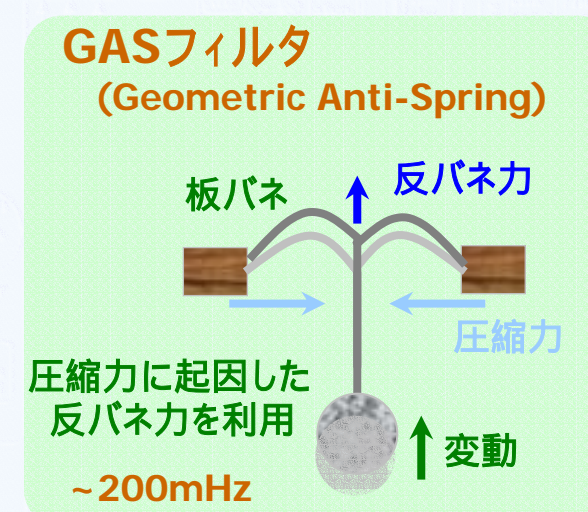
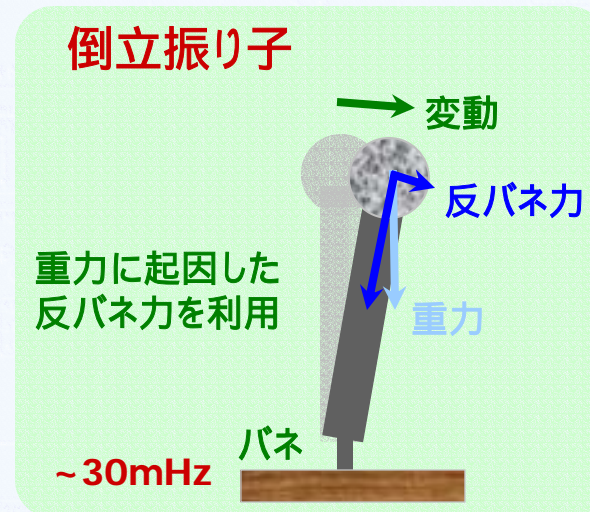
振り子
(横防振)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

バネ
(縦防振)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l_0}}$$

およそ 1Hz 25cm



その他 ...
X振り子
オイラーバネ
などなど

柔らかい系になる

ドリフトに影響されやすくなる

LCGTの技術 (10)

- 能動防振 -



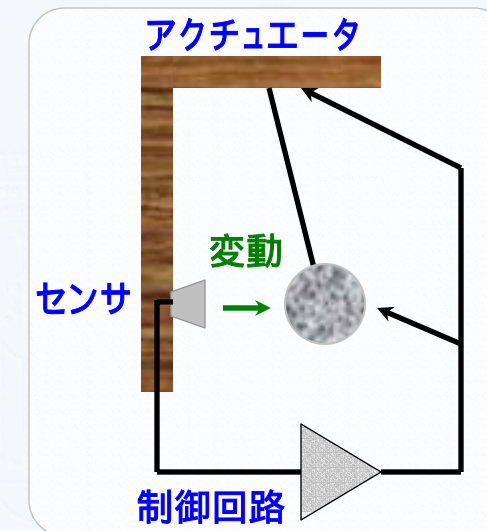
● 能動防振

制御によって振動を抑える防振法

センサで変動検出 フィードバック

支持系の共振周波数以下でも防振可能
制御ゲイン、**センサの雑音**で性能が制限される

⇒ **高感度センサが必要**
防振系の初段付近に使用されることが多い
(センサの雑音の混入を抑えるため)



TAMA (特許機器 $\alpha 2$)

空気バネと加速度センサ
を組み合わせた装置
水平・鉛直方向 2自由度
4ユニットを
各真空タンク下部に設置

LCGTの技術 (11)

- LCGTのデザイン -



● LCGTの防振装置

静かな神岡鉱山内に設置される
干渉計の基線長 **3km** (TAMAの10倍)

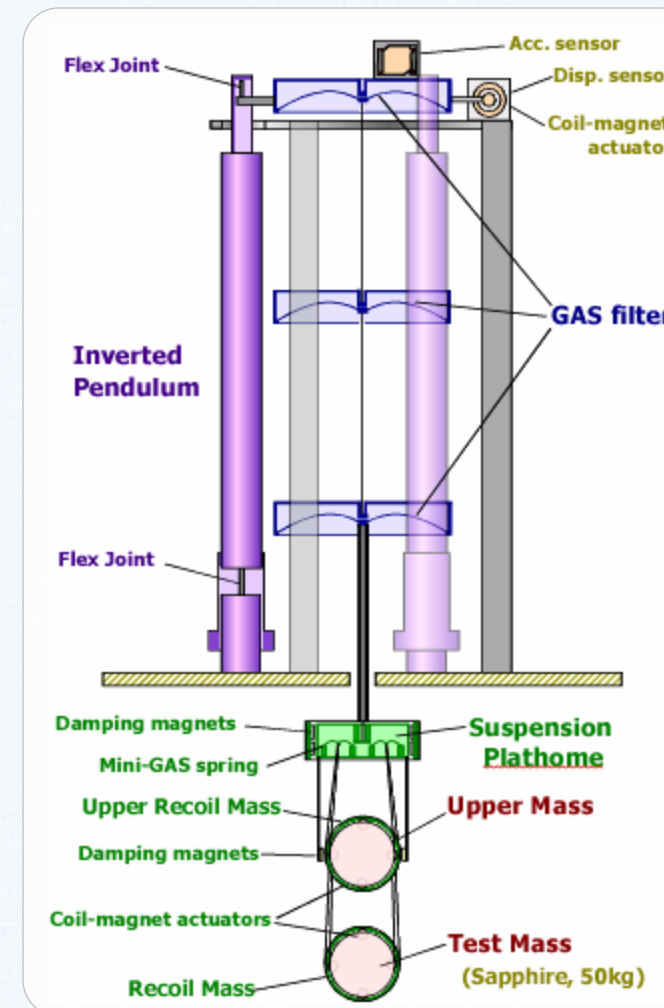
高性能防振装置

倒立振り子：低周波防振 (水平方向)
GASフィルタ：低周波防振 (鉛直方向)
2段振り子：低温に設置される懸架装置

ダンピング：
倒立振り子上部、2段振り子上段

懸架点干渉計

鏡の上段マス間干渉計による能動防振
高感度センサを利用した
高性能能動防振



LCGTの技術 (12)

- 熱雑音の基礎 -



● 熱雑音

鏡や振り子が有限温度の熱浴に接している事によって生じる振動

機械的振動 調和振動子

運動方程式 (ランジュバン方程式)

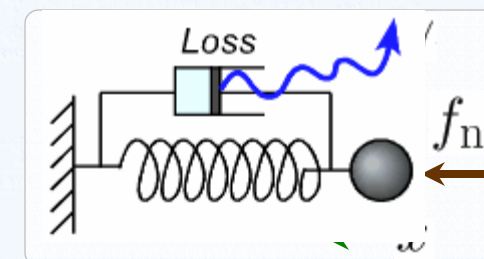
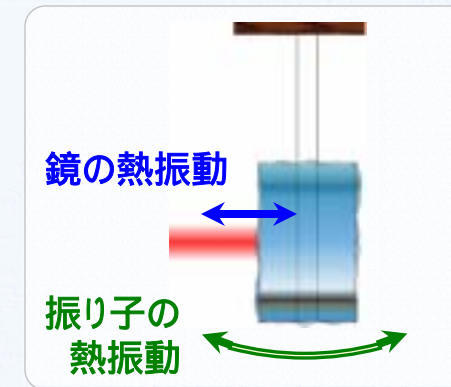
$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = f_n$$

熱揺動力
機械損失と関係 (揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2 k_B \gamma T \quad (\text{白色雑音})$$

$$\gamma = \frac{m\omega_0}{Q} \rightarrow \text{変動のスペクトル} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

損失を低減する (Q値を上げる), 温度を低減する



LCGTの技術 (13)

- 材質の機械損失 -



● 材質の機械損失

鏡の熱雑音, 振り子の熱雑音に影響

材質内部の機械損失

Q値の高い材質を選択

現在稼動中の干渉計

鏡 : 熔融石英, Q値 $10^6 - 3 \times 10^7$

振り子 : スチール線 など

TAMA 鏡 : 熔融石英, $Q \sim 3 \times 10^6$

振り子 : タングステン, $Q \sim 5 \times 10^5$



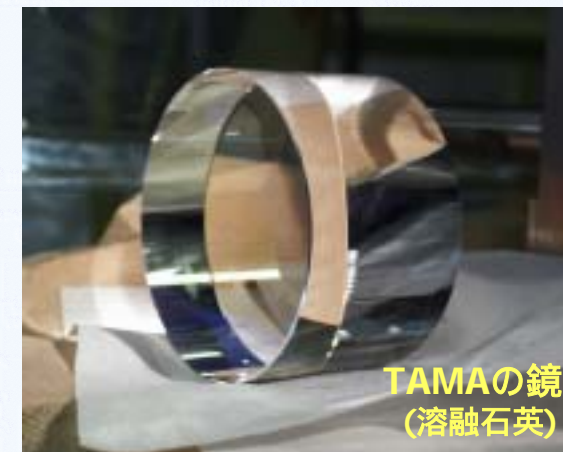
より高いQ値を持つ材質

鏡 サファイア : $Q \sim 6 \times 10^7$

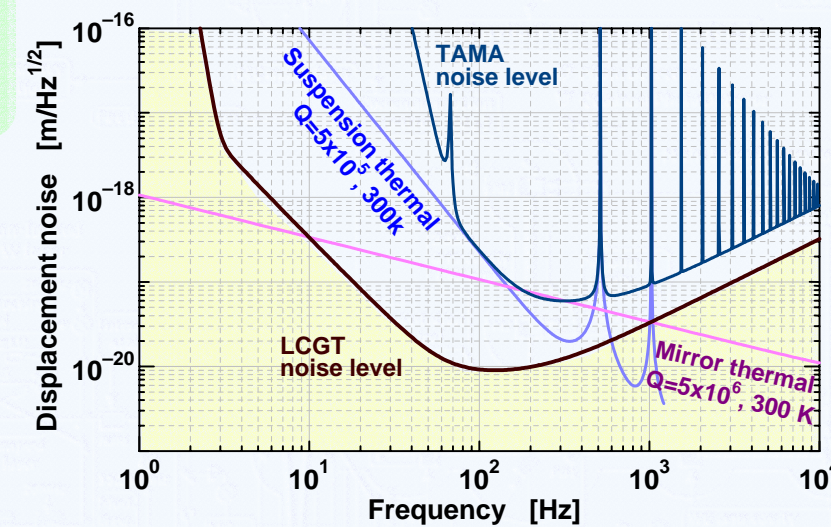
シリコン : $Q \sim 1 \times 10^8$

振り子 熔融石英ファイバ $Q \sim 1 \times 10^7$

サファイアファイバ $Q \sim 3 \times 10^8$



TAMAの鏡
(熔融石英)



LCGTの技術 (14)

- 低温化 -



● 低温化

鏡、振り子を低温化

熱雑音を低減
 材質のQ値が向上
 (サファイア 5×10^6 2.5×10^8)
 材質の熱伝導率が向上
 (熱レンズ効果、熱弾性効果)

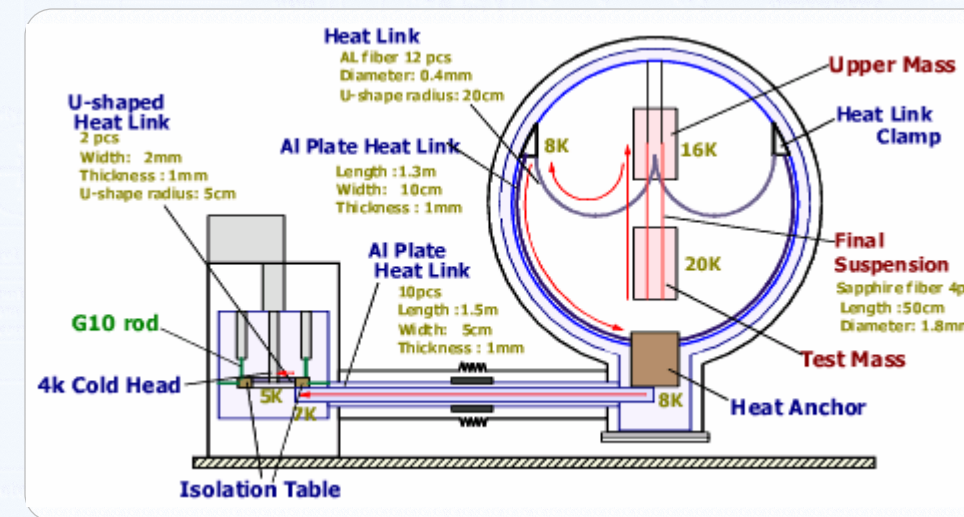
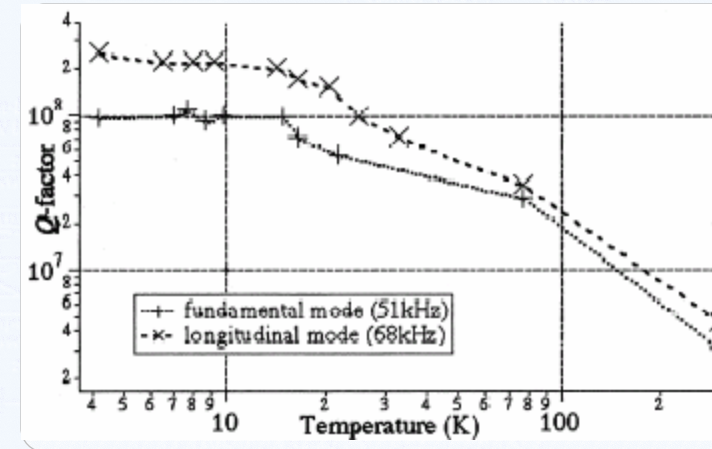


いかに冷やすか

鏡での発熱 (光吸収)

基材内、鏡コーティング面
 限られた冷却経路

熱伝導で冷却
 防振性能との兼ね合い
 冷却器による振動



LCGTの技術 (15)

- 冷却器 -



● 冷却器

4kへの高い冷却能力 (~1W)
低振動での動作



低振動型パルス管冷凍機

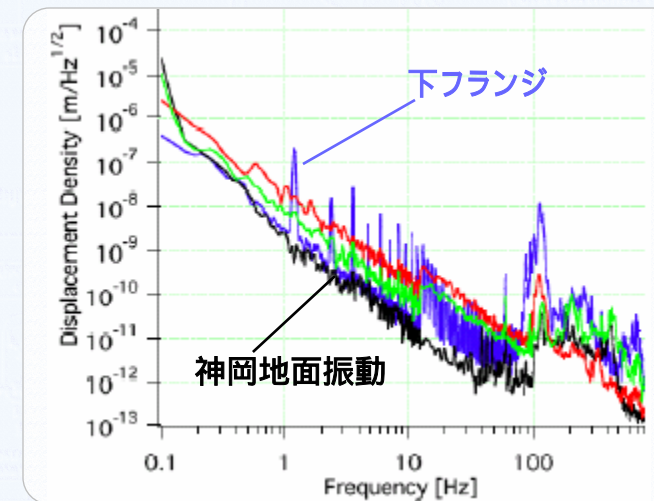
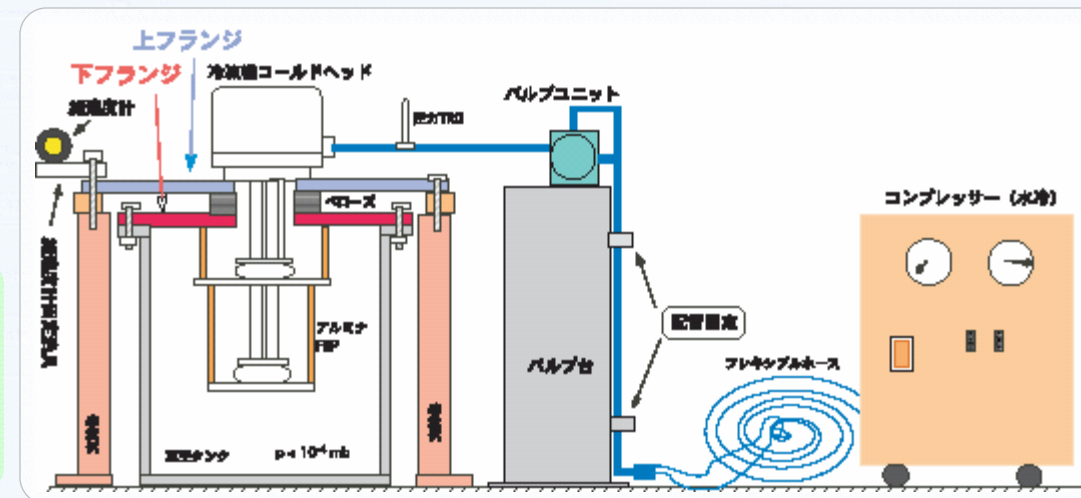
コールドヘッドは地面に固定
振動部は柔らかく接続
バルブユニットを分離



ほぼ神岡の地面振動レベル

1Hzの高調波成分：
コンプレッサーを室外に設置
除去

コールドヘッド - 被冷却体
は柔らかい熱伝導体で接続
純アルミ線による熱リンク



LCGTの技術 (16)

- 他の重要な熱雑音 -



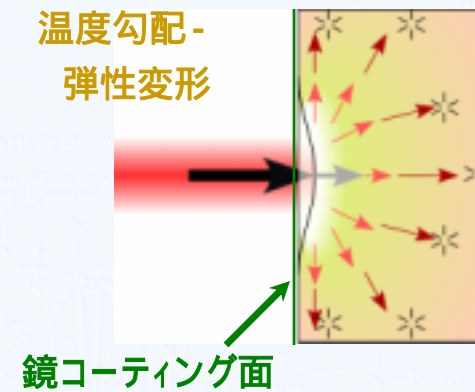
● 熱弾性効果による損失

非一様な弾性変形による温度勾配の緩和
に起因した散逸

主に、材質の熱的性質で決まる

線膨張率：小さい方が望ましい

熱伝導率：大きい方が望ましい



● コーティングの熱雑音

鏡コーティング面での機械損失

高反射率鏡面：

誘電体多層膜コーティング

屈折率の異なる2つの材質

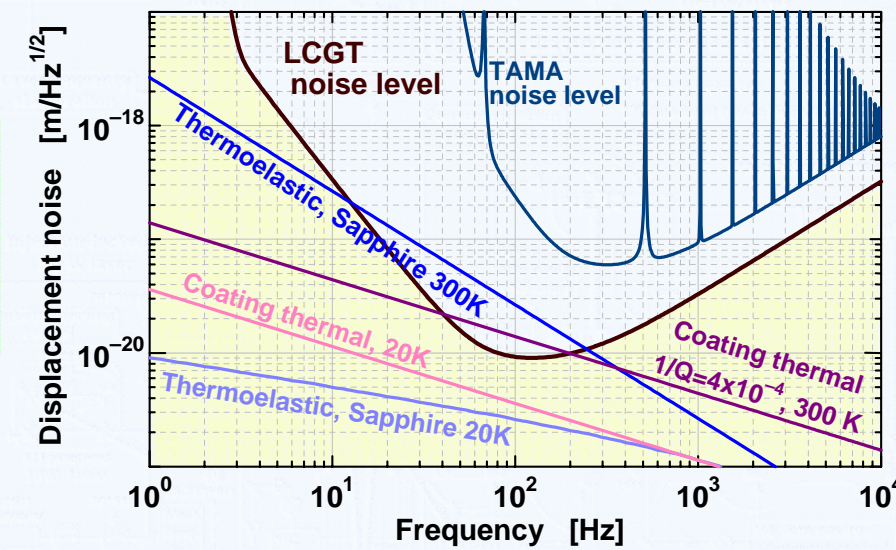
(TAMA : SiO_2 , Ta_2O_5)

$\lambda/4$ の厚さで重ねる (約30層)



材質の機械損失よりも大きい

反射面の変動のため、影響が大きい



LCGTの技術 (17)

- LCGTのデザイン -



● LCGTの熱雑音

鏡：サファイア, 20Kに冷却

機械損失の低減 (Q値の増加)

熱伝導率の増加, 線膨張率の低下

(熱レンズ, 熱弾性効果の影響小)

振り子：サファイアファイバ

(鏡への熱リンクの役割)

冷凍機：低振動型パルス管冷凍機

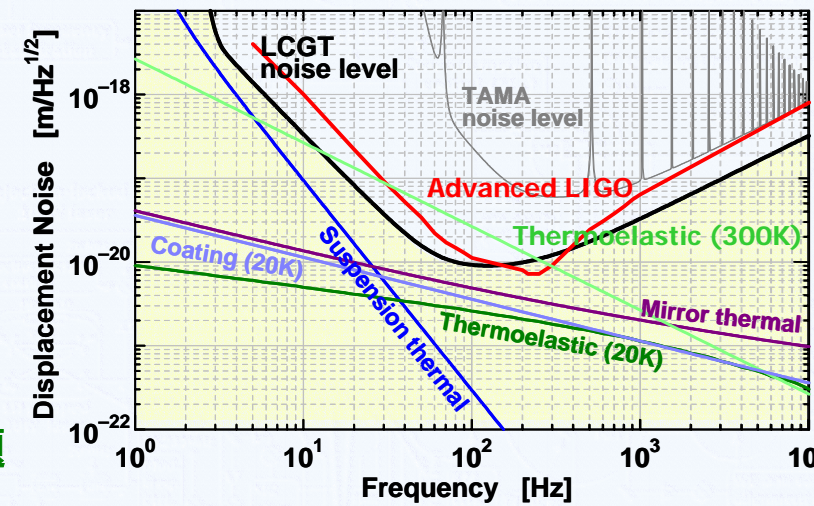
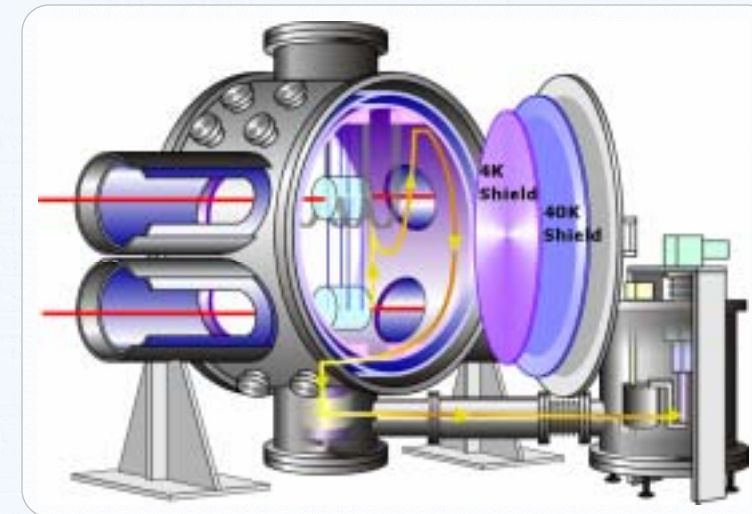
熱リンク：純アルミ線



LCGTでは、
熱雑音は十分低減できる

余計なお世話だが...

Advanced LIGOでは、
熱弾性効果, コーティングの熱雑音が問題



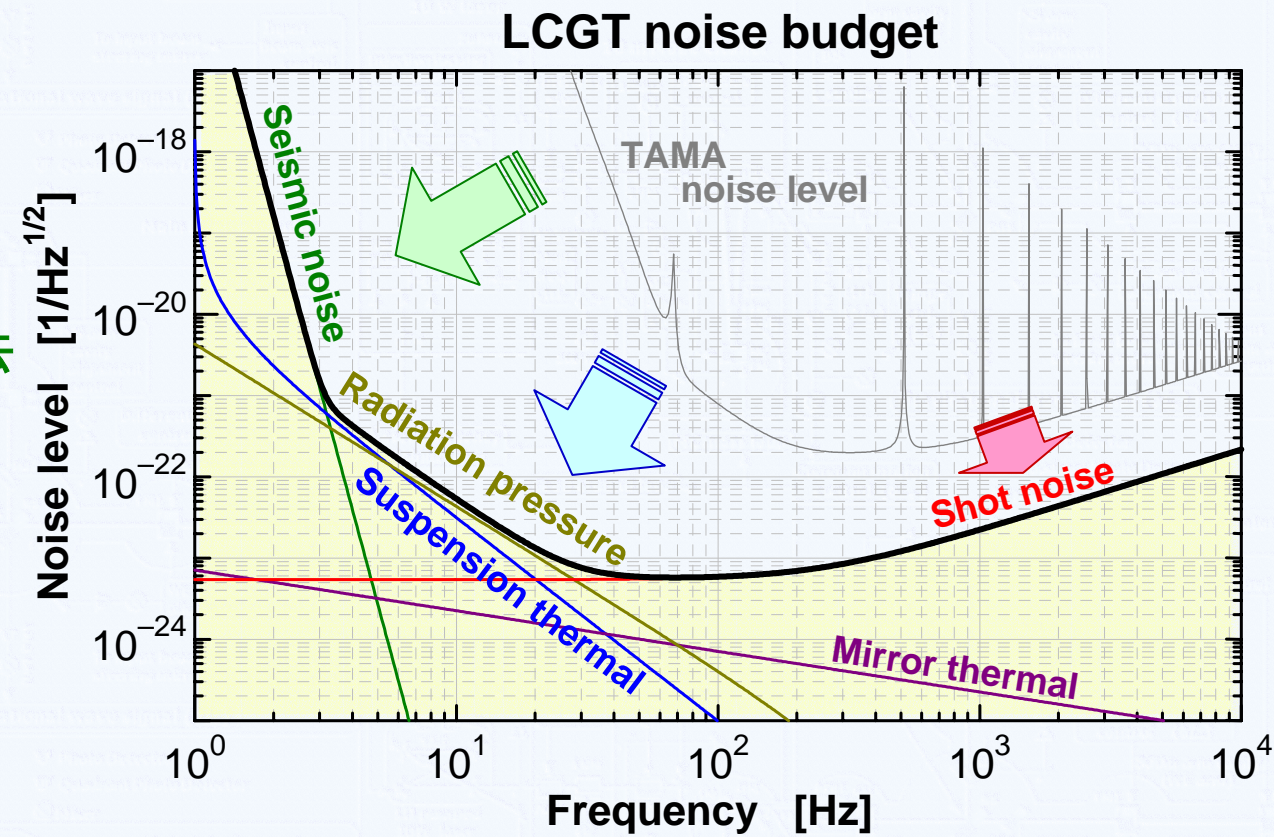
LCGTの技術 (18)

- 感度曲線 -



● LCGTの感度

ほぼ量子雑音で制限
240Mpcまで見通す
2台の相関
非定常雑音を除去



LCGTへ向けて (1)

- 現在の研究開発 -



- LCGTの実現に向けての研究活動
(2001-2005年度 特定領域研究 (A))
- 重力波研究の新しい展開 -

- LCGTへ向けての研究開発

- TAMA300の改良・観測

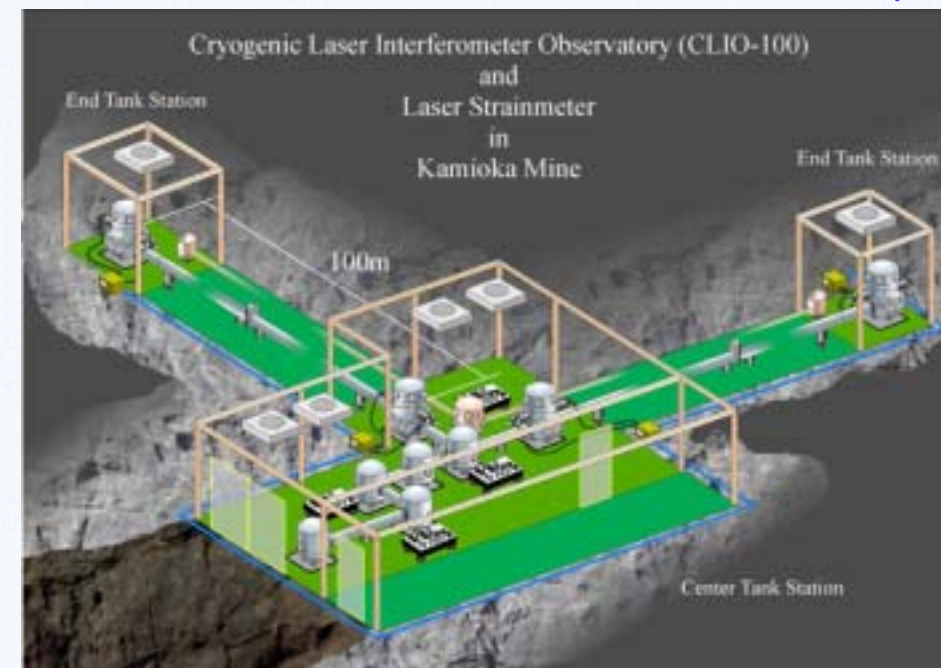
- 観測器としての成熟
 - データ解析
 - 新技術のテスト

- 低温干渉計(CLIO100)建設

- 基線長100m
 - 神岡鉱山に設置
 - 低温技術の確立

- 理論研究

低温干渉計 (CLIO100) 概念図
イラスト / S.Miyoki



LCGTへ向けて (2)

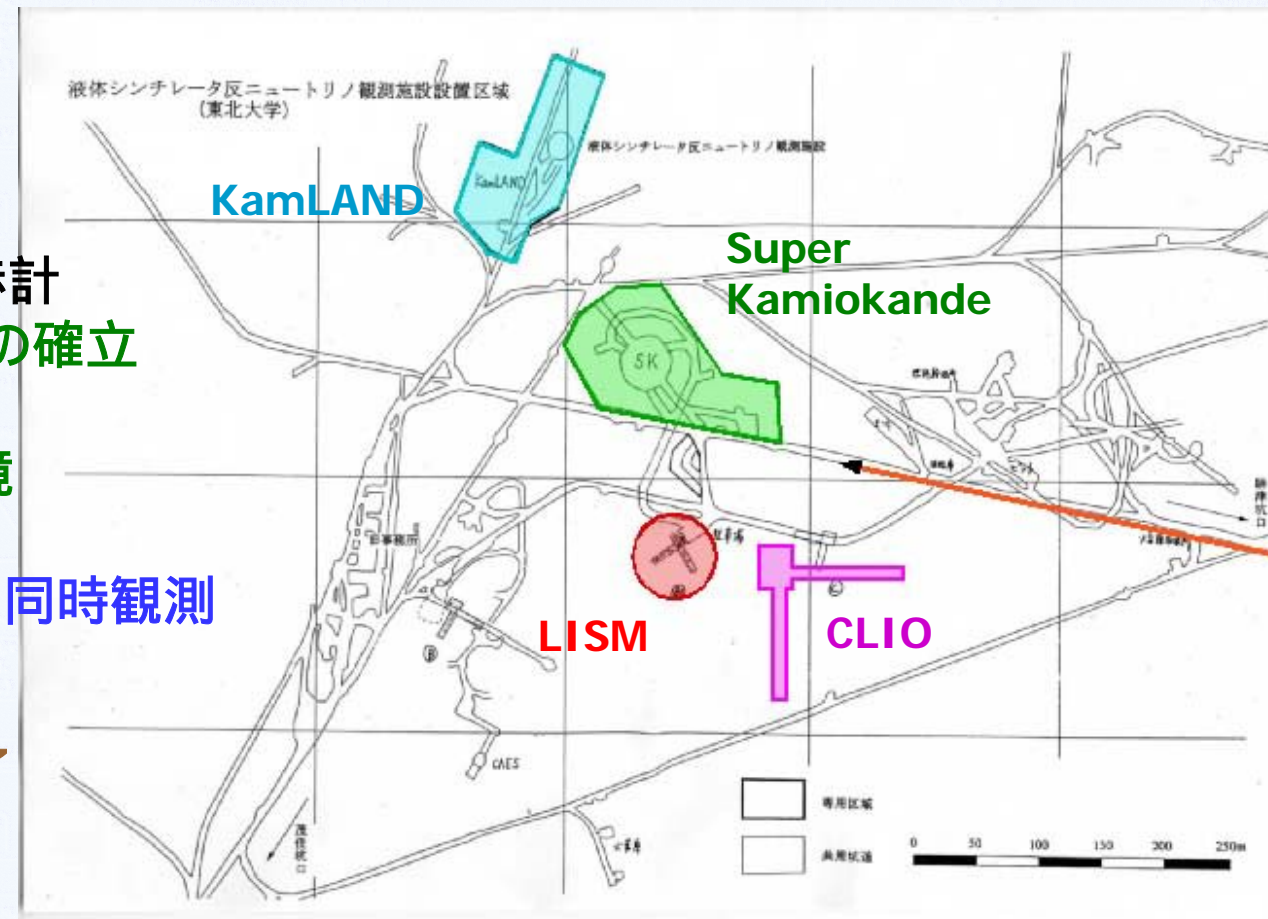
- 現在の研究開発 -



● CLIO (Cryogenic Laser interferometer observatory)

基線長100mの
低温干渉計
低温技術の確立
神岡鉱山に設置
安定な環境
高い感度
TAMAとの同時観測

掘削・塗装は終了
2004-建設開始

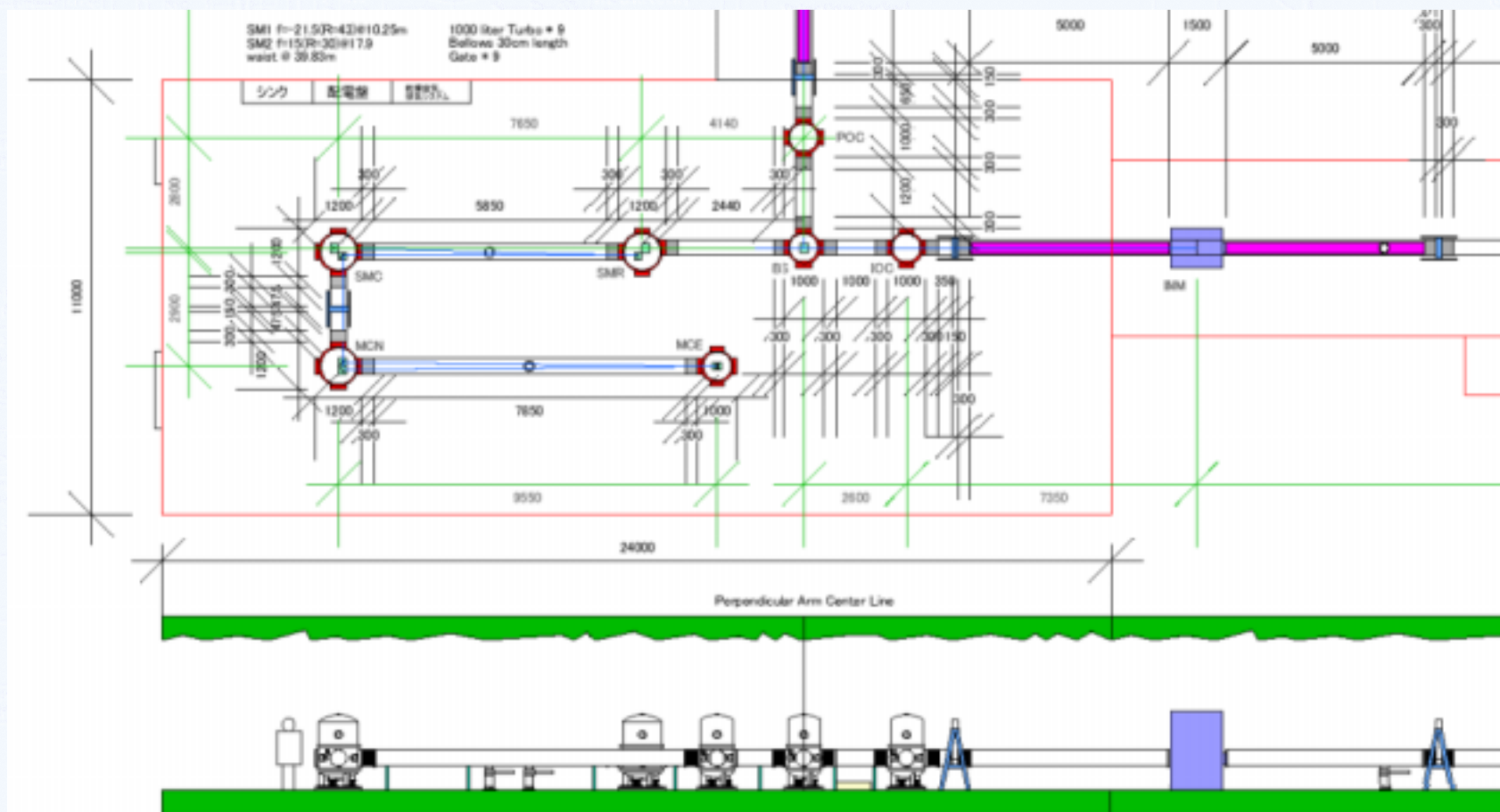


LCGTへ向けて (3)

- 現在の研究開発 -



●CLIOのレイアウト

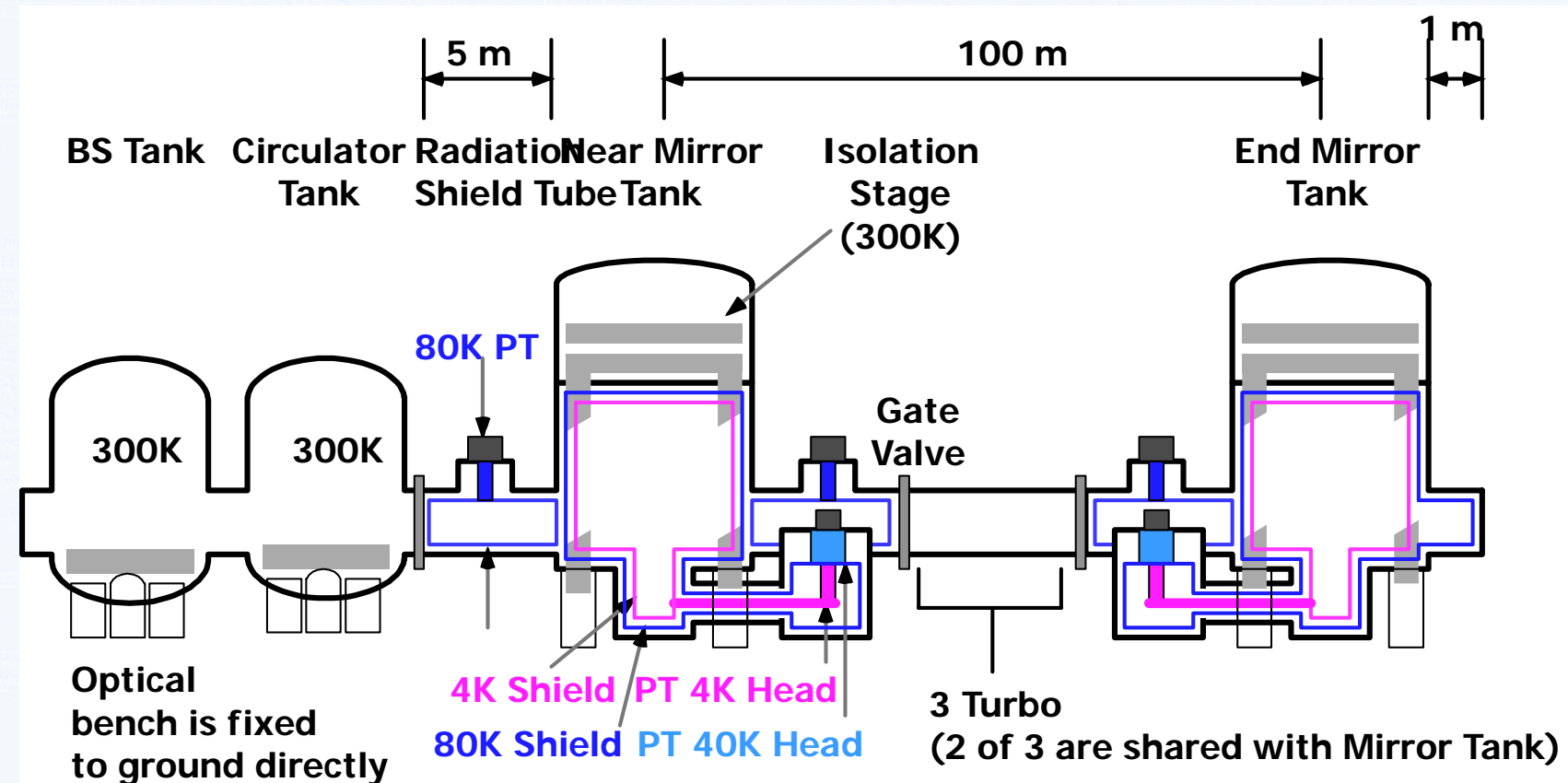


LCGTへ向けて (4)

- 現在の研究開発 -



● CLIOの真空・冷却装置



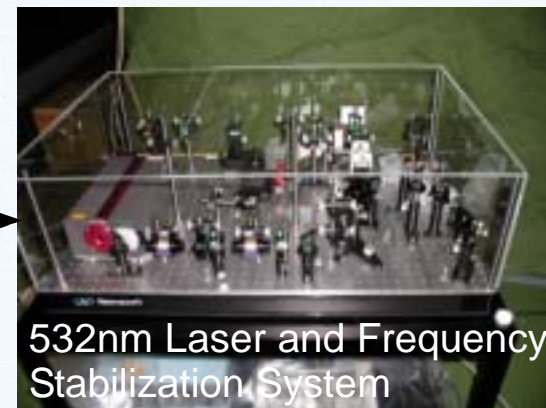
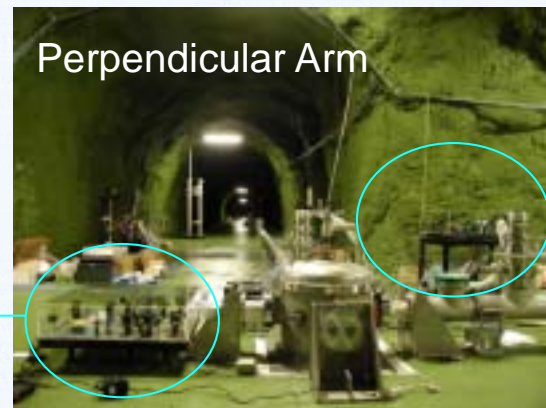
LCGTへ向けて (5)

- KLIS -



- レーザー歪み計

地球物理観測に使用, 共通の技術



LCGTのまとめ



- 日本のグループが共同でLCGTの建設を計画中
デザイン：まとまりつつある
研究開発が進められている

TAMA : 干渉計方式, 防振
観測システム, データ解析

CLIO : 低温干渉計, 地下環境

目次



3. LISA

概要

宇宙重力波検出器

- 重力波源 -

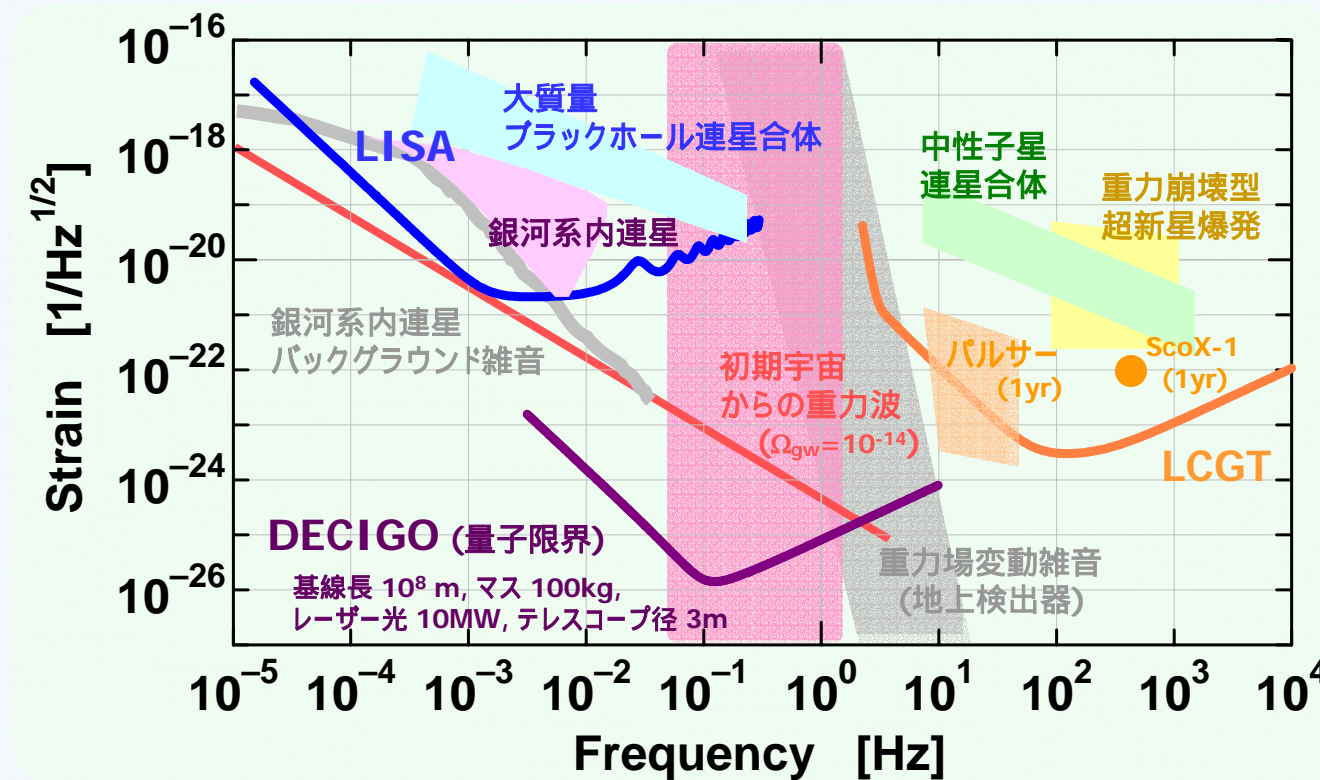


宇宙における干渉計型重力波検出器

様々な重力波源 **天文学**

初期宇宙からの重力波 **宇宙論**

➡ 宇宙での干渉計方式を考える
 確実な重力波源



LISA (1)

- 概要 -



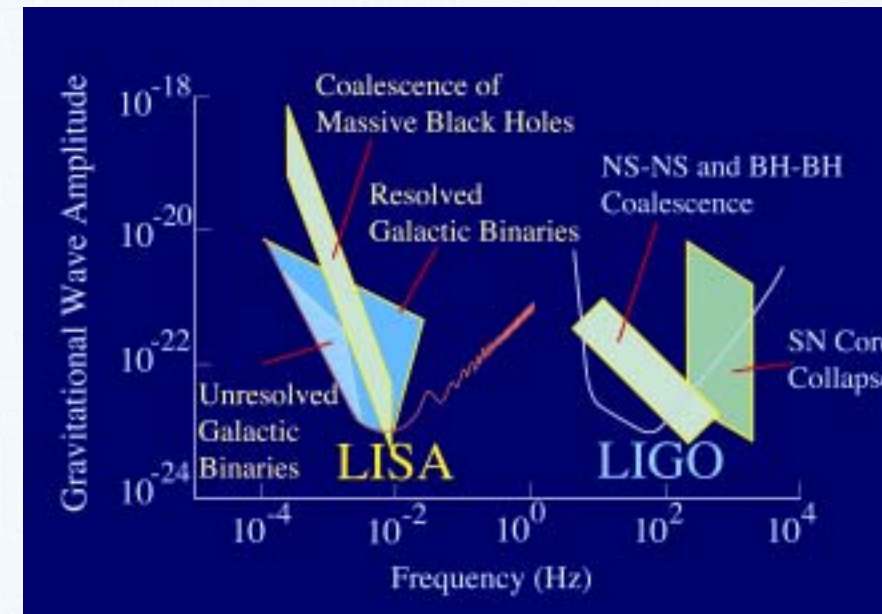
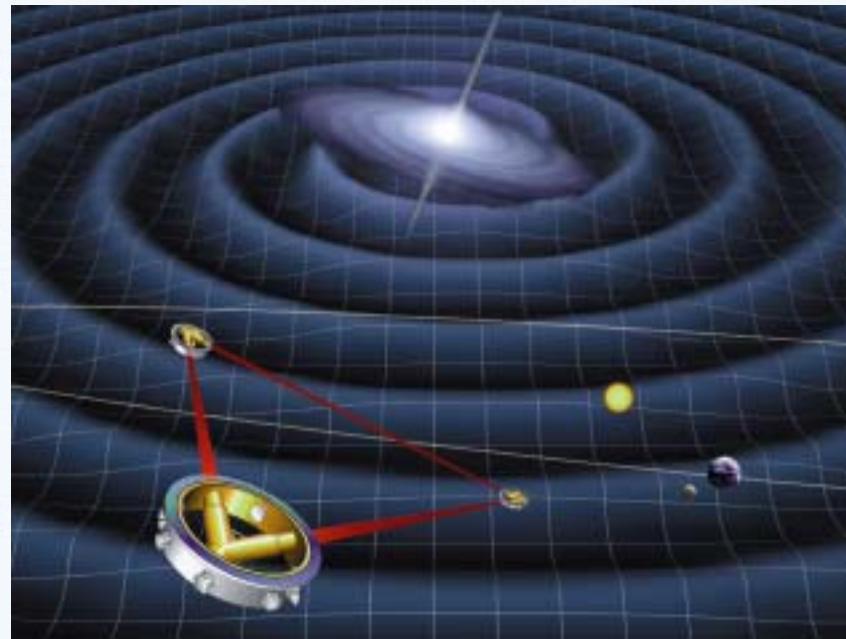
● 宇宙での重力波検出

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

基線長**500万km**の干渉計を打ち上げる

0.1mHz - 0.1Hz の周波数帯をターゲットにする

ESA/NASA共同で、**2012年**打ち上げ予定



LISA (2)

- 干渉計の構成 -



●LISAの光学系

3つのスペースクラフトで構成された3本の腕
5x10⁹ mという長基線長
基本はマイケルソン干渉計

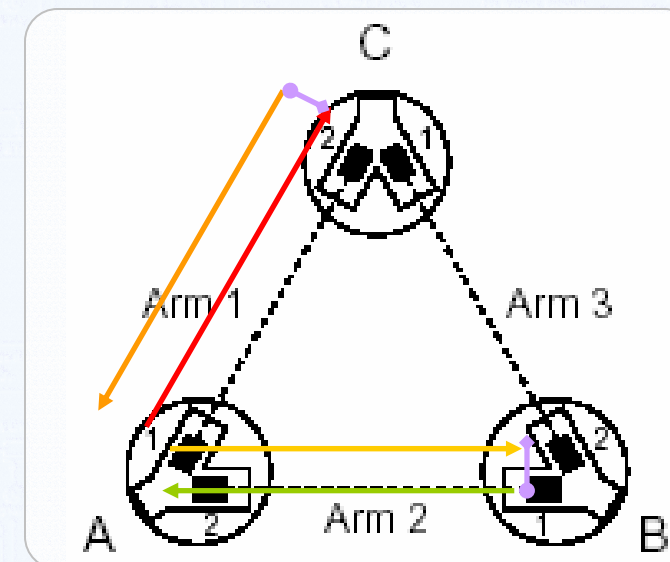


レーザー光の**回折損失**が大きい
ドップラー効果によって光の周波数が変動
⇒ 鏡による直接反射は不可能



位相同期による光増幅反射
相手のS/Cからの光と
自らのレーザー光源の位相を同期
相手のS/Cへ打ち返す

ヘテロダイン検波による変動検出
来た光と内部光源とのビート周波数で検出



LISA (3)

- 基線長と回折ロス -

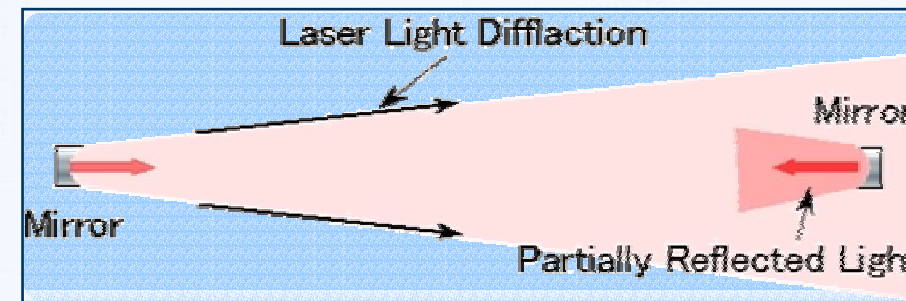


● 回折損失

レーザー光のビーム径は、
伝播とともに広がる

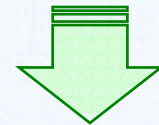


望遠鏡の大きさが
有限であることによる光の損失

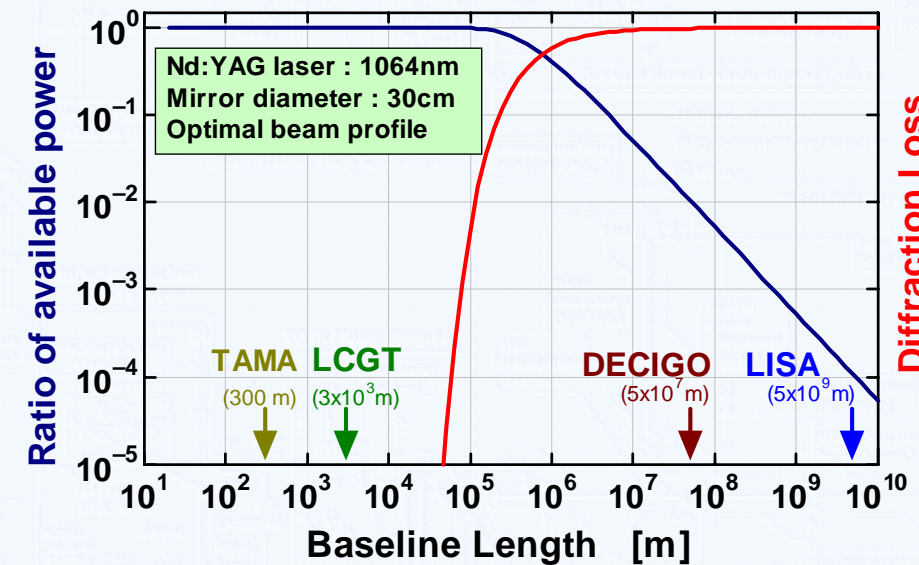


回折損失の見積もり

望遠鏡径 30cm
波長 1064nm
(最適なビームウエスト径)



基線長 10^5m 程度から
急激にロスが増加



LISA (4)

- 光学系デザイン -



- LISAのスペースクラフト (S/C)

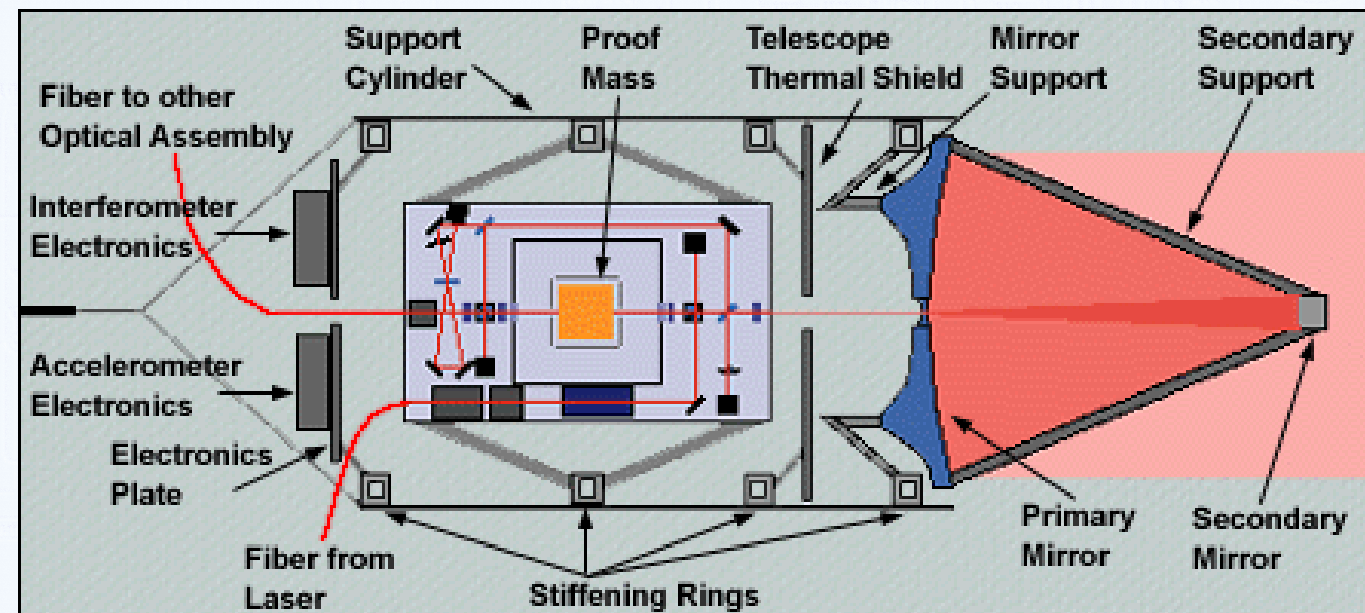
プルーフマス: **1kg Au-Pt alloy** ドラッグ・フリー制御

光学ベンチ: **1W Nd:YAG laser, 1064nm**

周波数安定化用共振器

位相検出装置

望遠鏡: **30cm diameter, /10**



目次



4. DECIGO

概要

DECIGO (1)

- 重力波源 -



●地上型とLISAの中間周波数帯

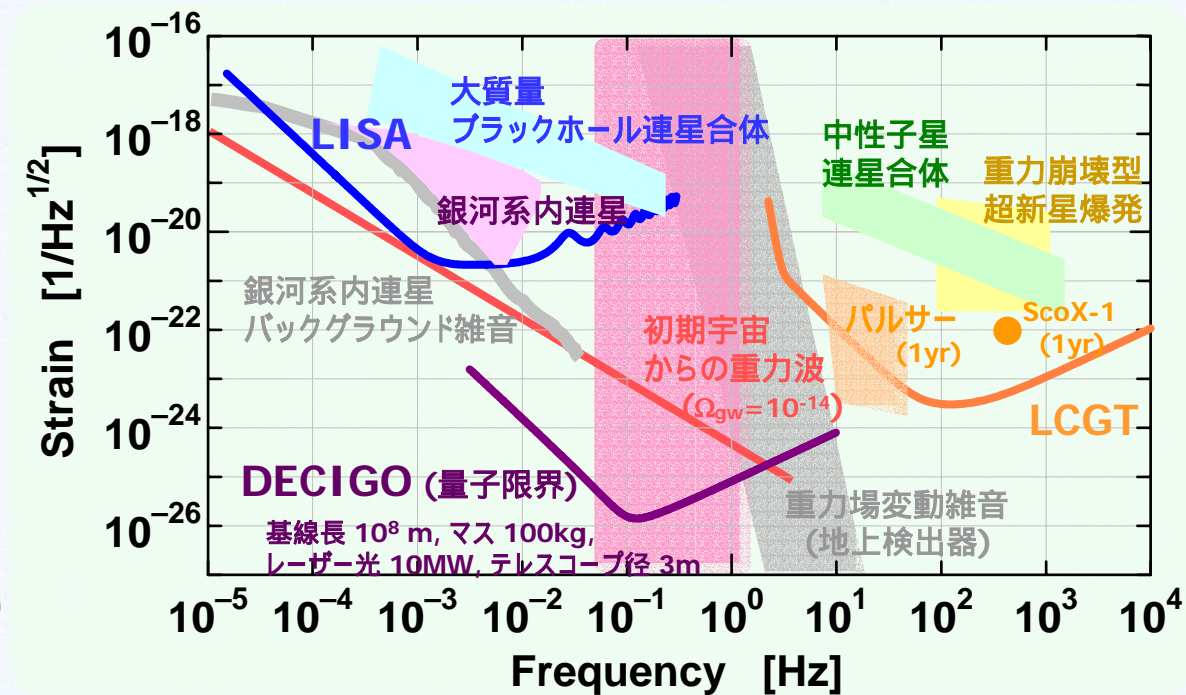
0.1Hz付近:

LISAでは重力波雑音, 地上では地面振動でマスク

中質量BHの重力波など
他とは異なる観測
初期宇宙からの重力波
宇宙の加速膨張の
直接測定
宇宙論



DECIGO (JPN)
BBO (NASA/ESA, 2025-)



DECIGO (2)

- LISAの技術の応用 -



DECIGO

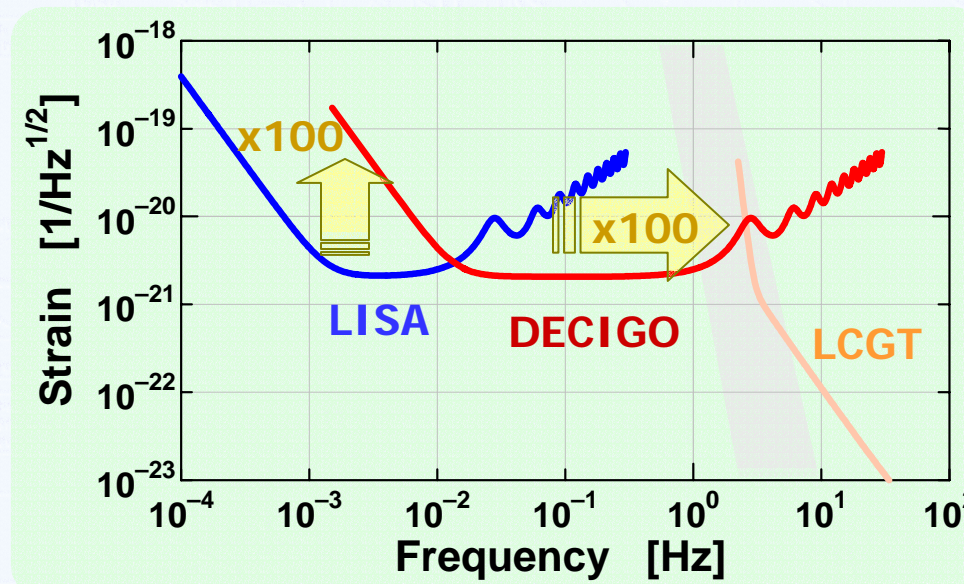
LISAの基線長を短くする 0.1Hz帯に最適化

⇒ LISAの基線長の1/100であるとする...
(基線長 : 5×10^7 m)

ちなみに、BBOは ...
望遠鏡径 3m
光源パワー 100W
... らしい

低周波数帯 (加速度雑音)
レベルが 100倍 に増加
高周波数帯 (主に散乱雑音)
フロアレベルは変わらず
カットオフ周波数が 100倍

↓
観測周波数帯が
高周波数帯へ移動



DECIGO (3)

- 散射雑音 -



● 散射雑音レベル

フロアレベルは $\frac{1}{L\sqrt{P}}$ に比例
 L : 基線長, P : 光強度



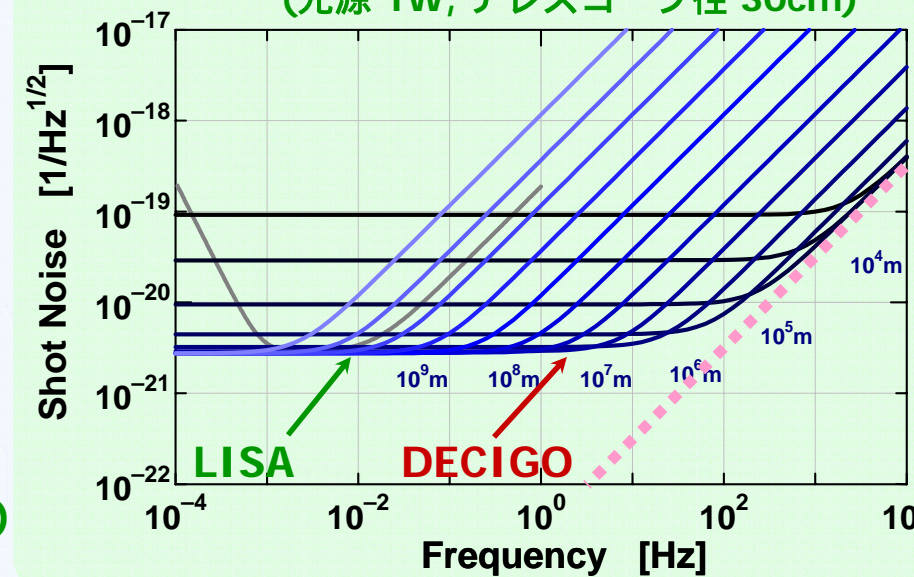
基線長 100km 以上では
回折ロスの影響、基線長増加の効果
フロアレベルは変わらない



高感度化には、
光パワーの増加が不可欠

- ハイパワーレーザーの開発 ($P^{1/2}$ で向上)
- 大口径ミラーの開発 (D^2 で向上)
- 検出系の高効率化 ($\propto 1/2$ で向上)
- 光源の短波長化 ($\propto -3/2$ で向上)

基線長を変えたときの散射雑音レベル
(光源 1W, テレスコープ径 30cm)



DECIGO (4)

- 別の可能性 -



DECIGOの高感度化

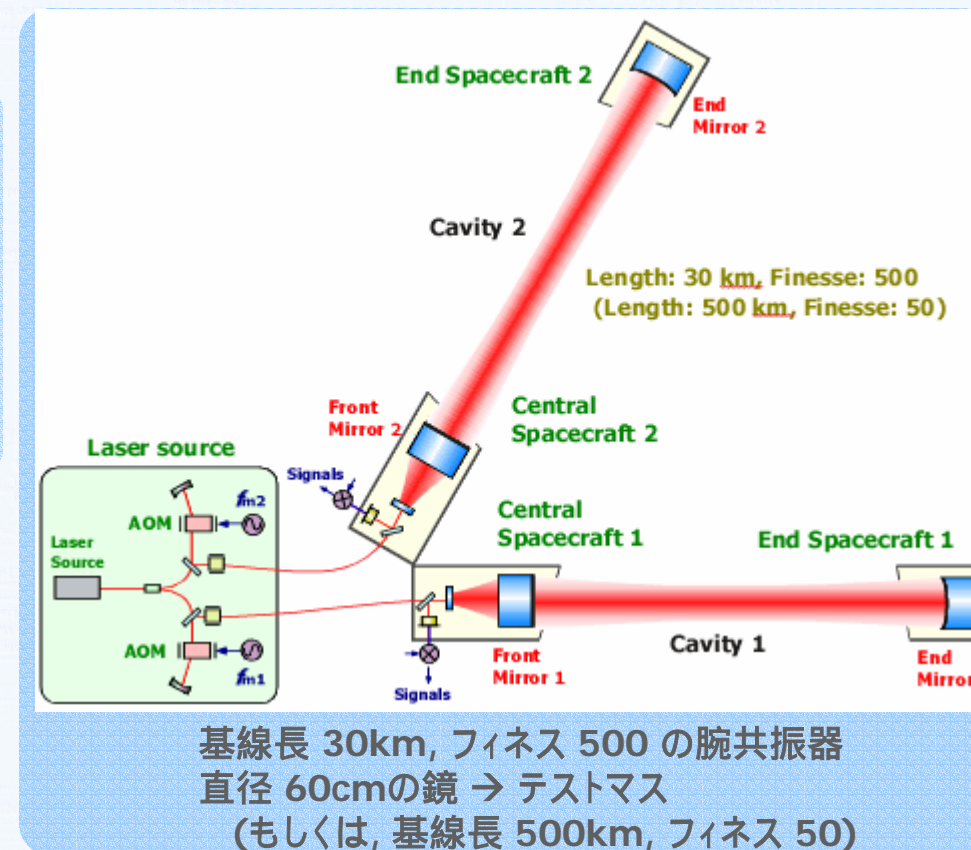
高感度実現には高レーザーパワーは不可欠

FP-DECIGO

短基線長 光の損失を防ぐ
FP共振器 実効基線長を稼ぐ

LISA型の短縮としてではなく、
地上型干渉計の拡張
(光の直接反射)

共振器による光パワーの増加
検出系の簡素化：
自由質点間の距離の直接測定



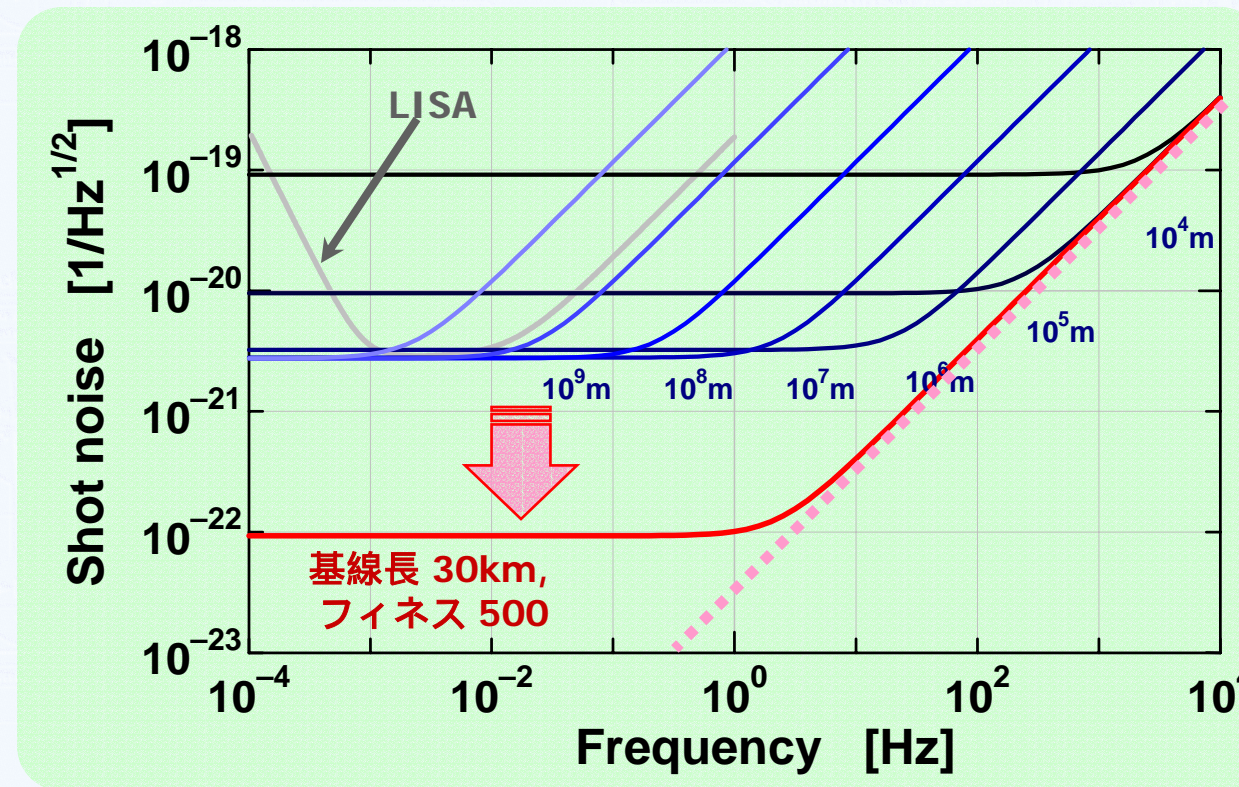
DECIGO (5)

- 散射雑音レベル -



● 散射雑音レベル

基線長 30km, フィネス 500 (光源 1W, テレスコブ径 60cm)



DECIGO (6)

- 軌道計算 -



● 軌道計算

太陽重力のみを考慮 (ケプラー運動)

十分制御可能な変動

惑星などの摂動を考慮

多体問題 数値計算

地球, 木星, 金星の影響が大きい



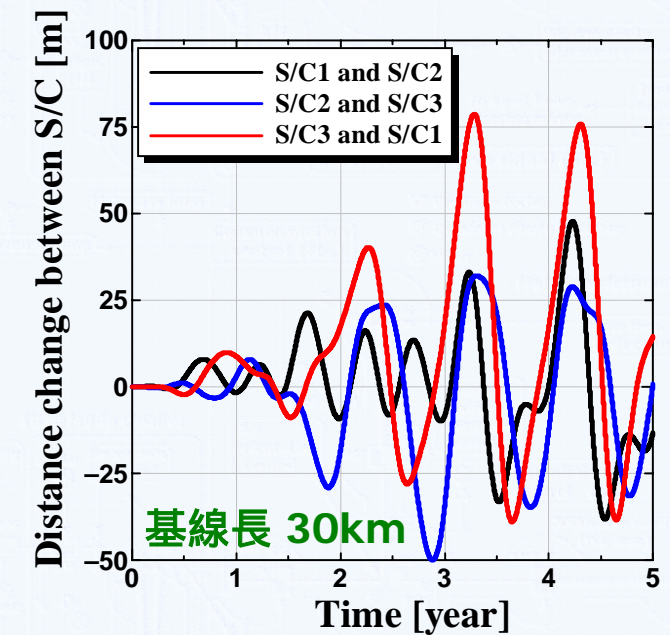
地球から遠ざける :

太陽から見て地球の45度後ろ

(地球の効果と他の木星の効果が同等)

基線長	年間の基線長変化
30 km	1 mm
500 km	30 cm
5×10^6 km (LISA)	3×10^4 km

基線長	年間の基線長変化
30 km	10 m (10cm/30 days)
500 km	200 m (10cm/7days)
5×10^6 km (LISA)	3×10^4 km



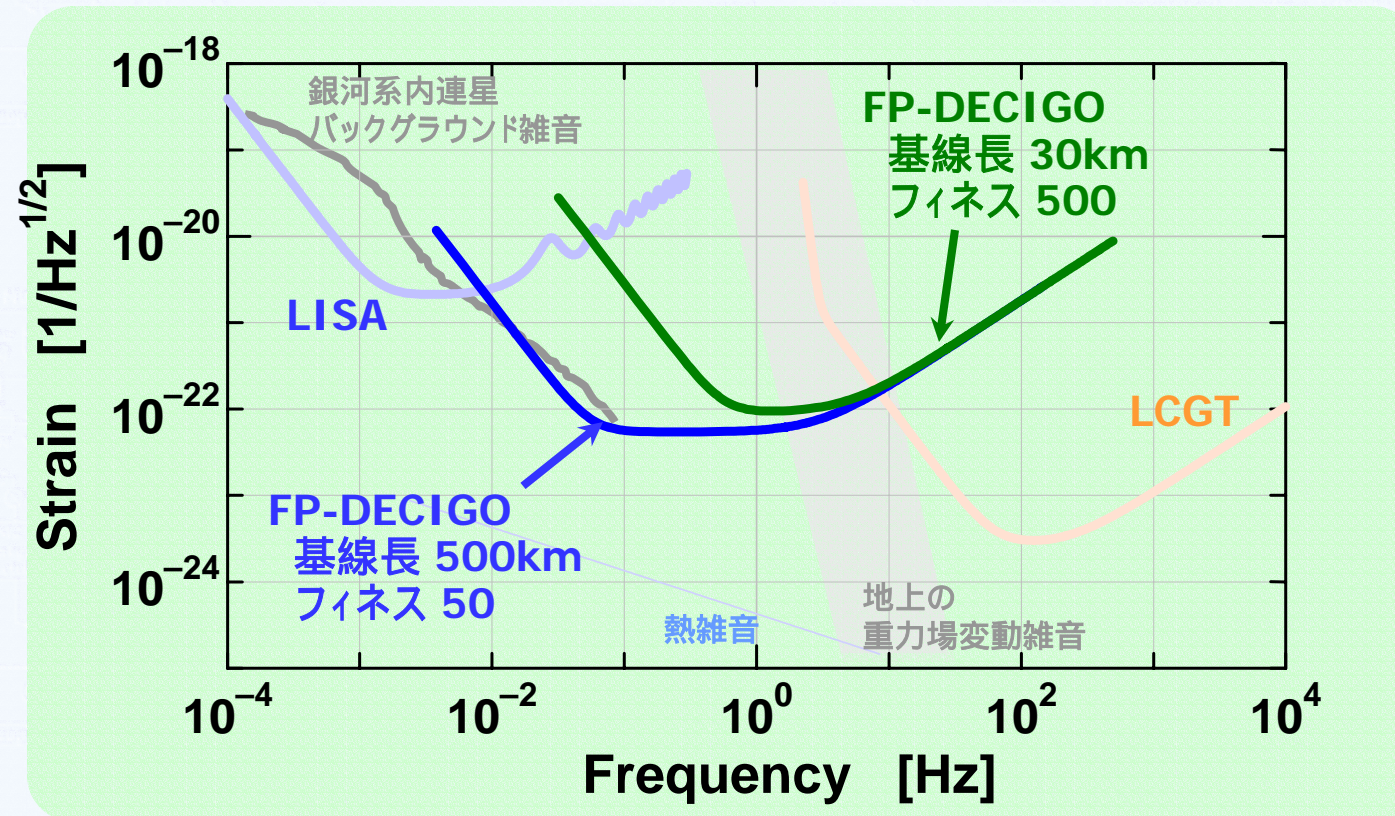
DECIGO (7)

- 感度曲線 -



● FP-DECIGOの感度

LISAとLCGTの間を埋める感度



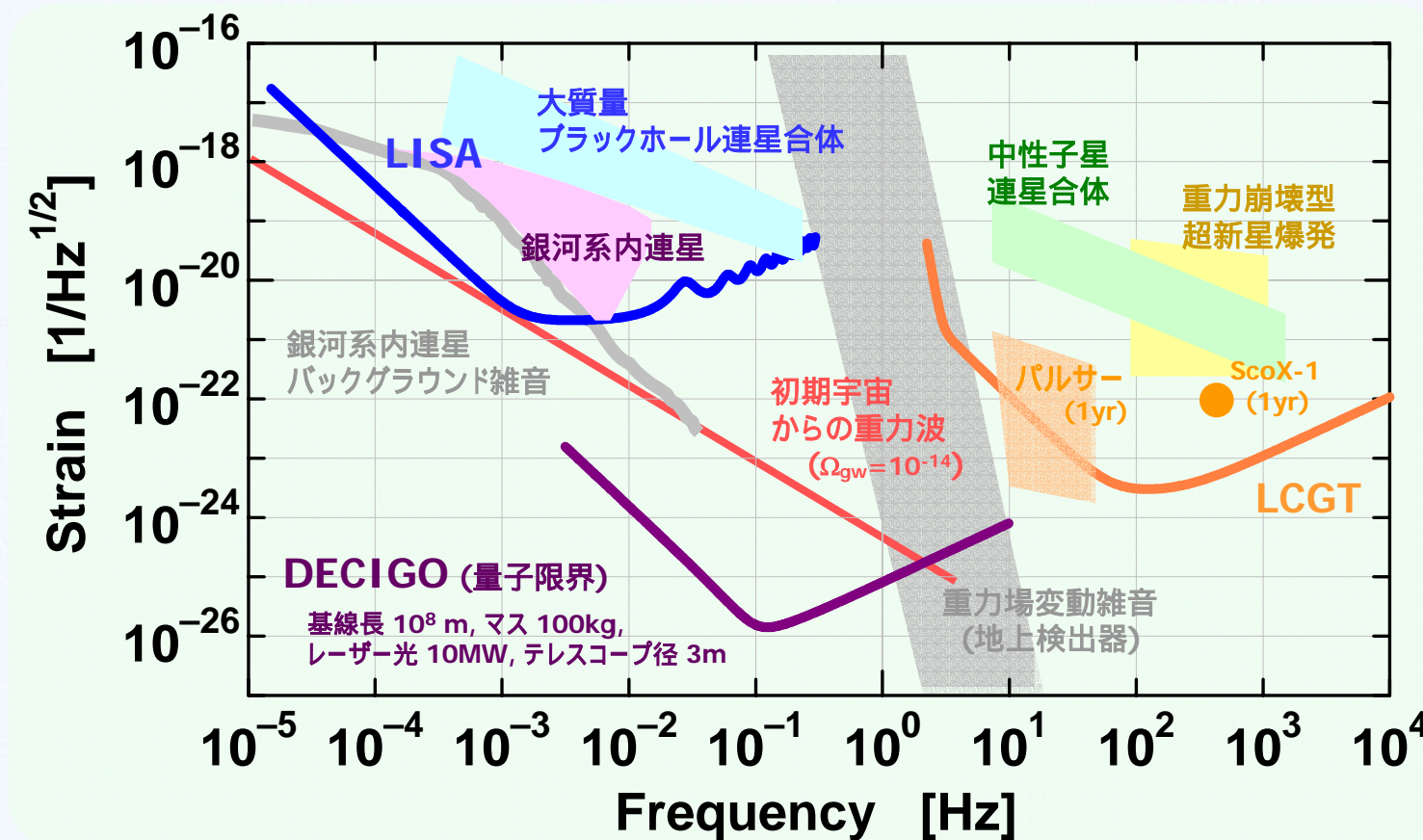
宇宙干渉計

- まとめ -



- 将来の重力波天文学

高感度化, 多波長化 ⇨ 電磁波と相補的な天文学・宇宙論



おわりに



- 重力波の検出

重力波の理論的予測 (1916年) から90年弱

重力波検出器の開発開始 (1960年頃) から40年強



共振型検出器による観測ネットワーク
干渉計型検出器の本格的観測の開始
より高感度の検出器計画 (地上・宇宙)



重力波の存在予測100周年 (2016年) までに直接検出
重力波天文学の幕開け

予期していなかった発見がある...かも

おわり



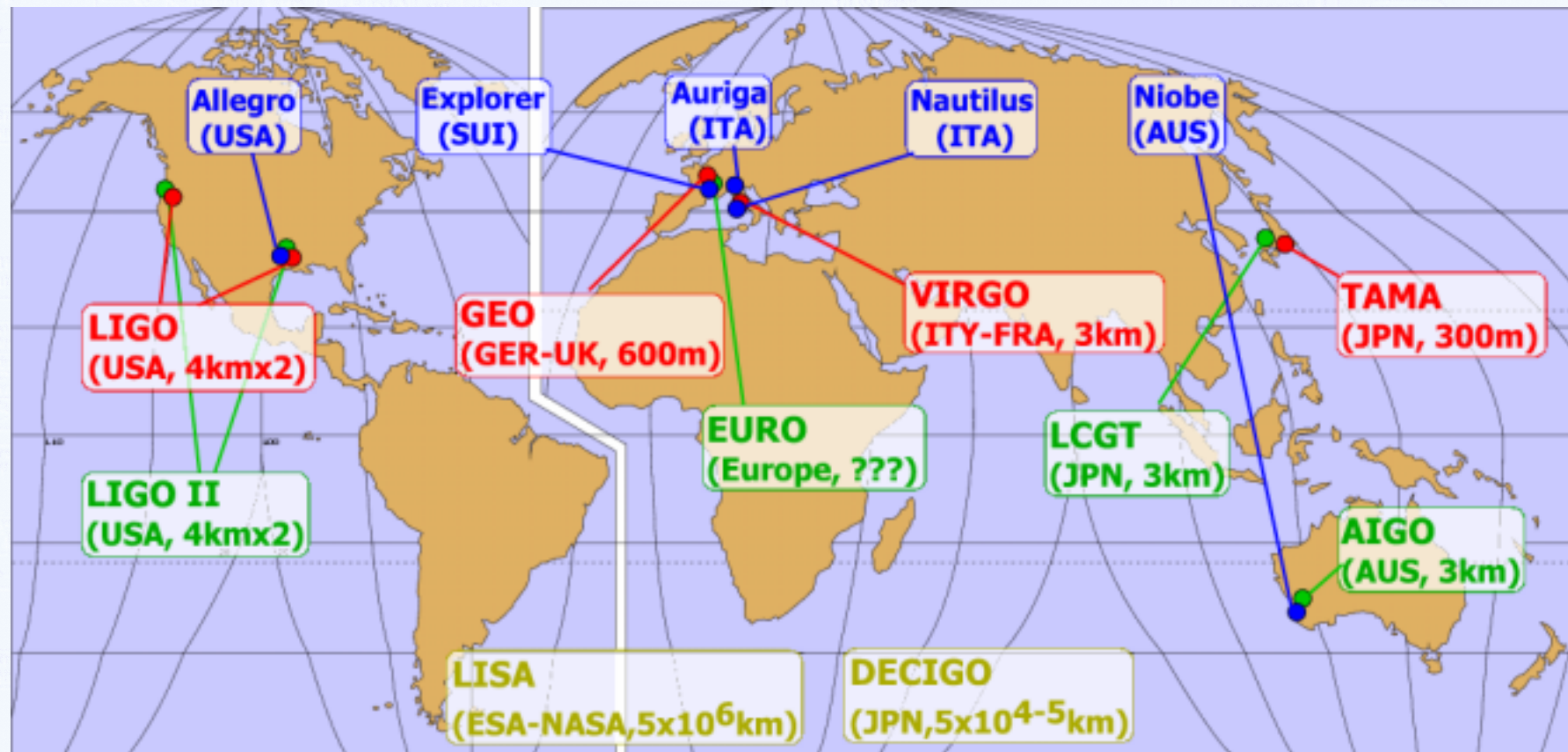
終

LCGTへ向けて (2)

- 将来の重力波検出器 -



●世界の将来計画



宇宙重力波検出器 (4)

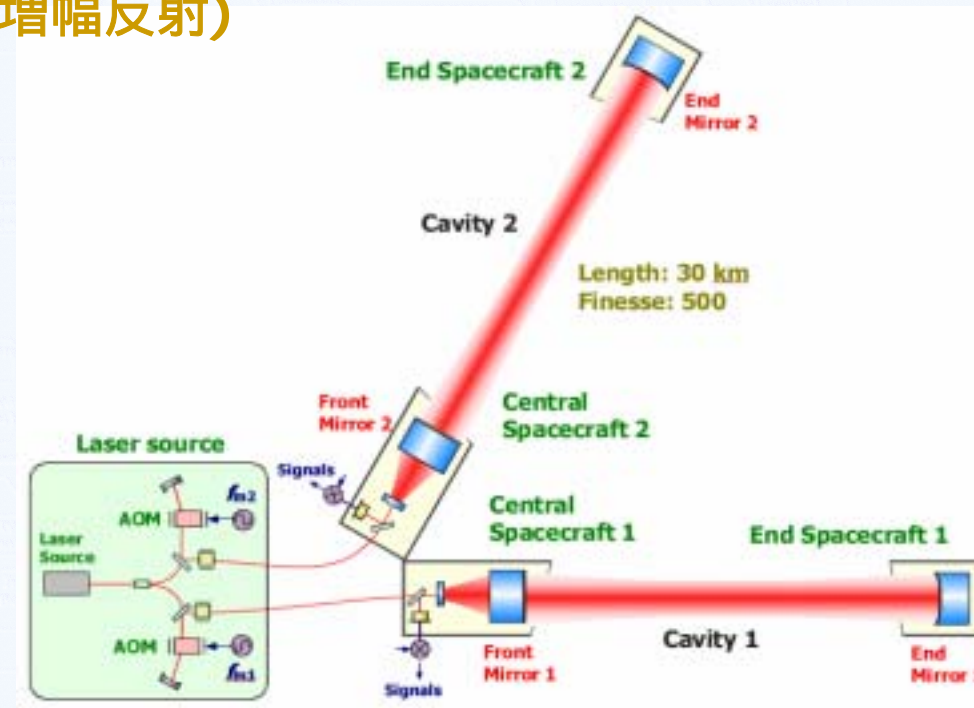
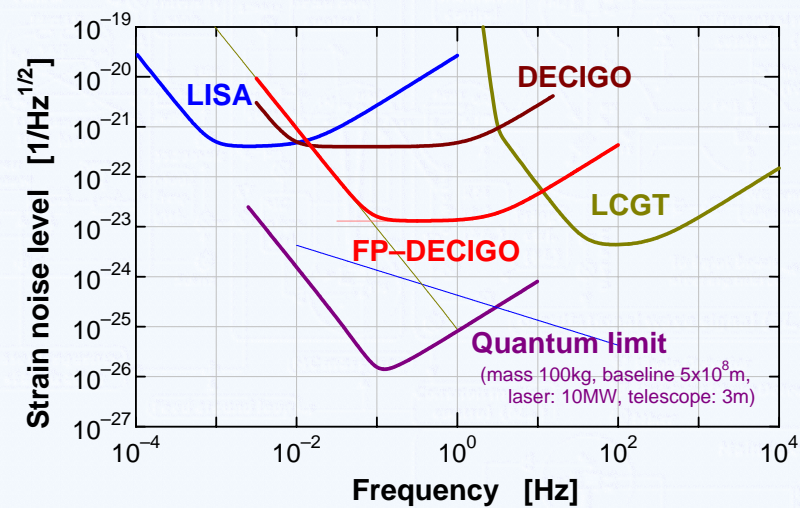
- FP-DECIGO -



● FP-DECIGO

- 基線長500kmの直接反射型干渉計
(LISA : 位相同期による増幅反射)
- 鏡の直径1m, 100kg
- レーザー光源 1W

➡ より現実的???



III-3 直接干渉型DECIGO (3)

- 利点 -



- 直接反射型の利点

- LISAと比較して光を有効に利用できる

⇒ 散乱雑音レベルの向上

- 光路上に余分な要素が無い (テレスコープ, 位相同期系)

鏡(テストマス)間の距離を直接計測

⇒ 重力波の検出原理により近い計測法

ドラッグ・フリー制御系への要求緩和

- 検出器の簡素化

単一光源

位相同期、精密なドラッグフリー制御が不要

短基線長 ミッション実現時間の短縮

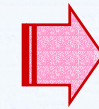
III-3 直接干渉型DECIGO (4)

- 課題 -



● 直接反射型の課題

- **変位雑音**の影響を受けやすい
外来雑音 (重力場・磁場変動)
スペースクラフト内の重力場・磁場
輻射圧雑音, **熱雑音**



スペースクラフトによるシールド
近くにあることによる同相雑音除去
輻射圧雑音
鏡の大質量化, 制御による抑圧

- 光路長などの**精密制御が必要**
光の波長より十分良い精度の制御
アラインメント制御



短基線長なら、**軌道変動も小さい**
制御によって抑圧
光源へのフィードバック

- **大型の鏡が必要**
形状誤差, 研磨精度



形状誤差, 研磨精度は、
望遠鏡でも同様の要求

TAMA300 (4)

- 感度限界と改良 -



● 干渉計型重力波検出器の感度限界

● 地面振動

地面の振動が鏡を揺らす影響

⇒ 防振装置、長基線長、静かなサイト

● 熱雑音 (鏡の熱雑音・振り子の熱雑音)

鏡やその支持系の熱振動

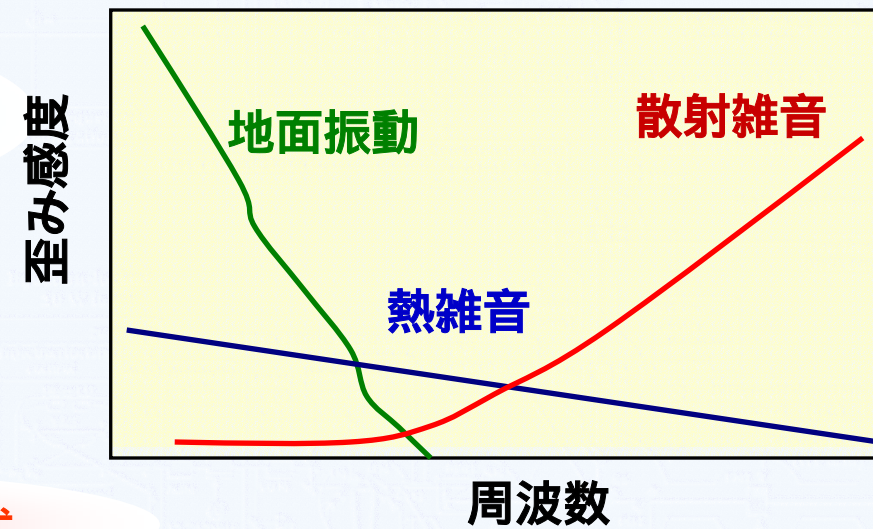
⇒ 高いQ値、鏡などの冷却、
長基線長

● 量子雑音 (散乱雑音・輻射圧雑音)

レーザー光が光子の集合
であることに起因する雑音

⇒ 高出力レーザー、干渉計方式

干渉計型重力波検出器の感度限界



LCGTの概要(4)

- LCGT -



Laser

$\lambda = 1064\text{nm}$
Power = 100 W before RM
(original = 300W)

Main Cavity

L = 3km
Finesse = 1250
Beam Radius(w) = 3cm
Cut Freq. = 20Hz

Recycling&RSE

Power Recycling Gain = 10
Signal Sideband Gain = 10
Stored Power = 0.78MW
Cut Freq. = 200Hz

Vacuum

Pressure = 10^{-9} Torr

Final Suspension

Material = Sapphire
Final Stage Length = 50cm
Diameter of Wire = 1.5mm
Number of Wires = 4
Reso. Freq. = 0.7Hz
Temp. = 10K
Loss Angle = 2×10^{-7}
Q of final suspension = 10^8

Mirror

Material = Sapphire
Diameter = 30cm
Thickness = 18cm
Mass = 50 kg
Absorption Loss = 20ppm/cm
Temp. = 20 K
Q = 10^8
Coating Thickness = 5 μm
Loss of coating = 10^{-4}